

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra metalurgie a slévárenství

Výroba a vlastnosti litých kovových pěn s pravidelnou
strukturou

Manufacturing and Properties of Cast Metallic Foams with
Regular Structure

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Tomáš Románek

Studijní program:

N2109 Metalurgické inženýrství

Studijní obor:

2109T038 Moderní metalurgické technologie

Téma:

Výroba a vlastnosti litých kovových pěn s pravidelnou strukturou
Manufacturing and Properties of Cast Metallic Foams
with Regular Structure

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Cíl práce
2. Slévárenské technologie výroby litých kovových pěn s pravidelnou strukturou
3. Vlastnosti kovových pěn s pravidelnou strukturou, možnosti aplikace
4. Experimentální část
5. Diskuse dosažených výsledků
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] DAIRON, J. et al. *Mousses métalliques: CTIF innove dans les matériaux cellulaires*. Fonderie – Fondateur d'aujourd'hui, No 295, 2009, pp. 12 – 19.
- [2] GAILLARD, Y. et al. *Les mousses d'aluminium CTIF par voie de fonderie*. Fonderie – Fondateur d'aujourd'hui, No 250, 2005, pp. 13 – 24.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Lichý, Ph.D.**

Konzultant diplomové práce: Ing. Filip Radkovský

Datum zadání: 30.11.2016

Datum odevzdání: 21.04.2017



prof. Ing. Karel Michalek, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování diplomové práce

I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání diplomové práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah DP |
| 2. Originál zadání DP | 7. Textová část DP |
| 3. Zásady pro vypracování DP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + mistopřisežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + mistopřisežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníky a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm, zarovnání do bloku. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9). Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách).

U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690. Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní DP také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení DP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem navazujícího magisterského studia Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2016/2017.

Ostrava 2. 12. 2016



Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 21.4.2017

Domas Romanec
.....
podpis (jméno a příjmení studenta)

Rád bych poděkoval vedoucímu své diplomové práce panu doc. Ing. Petru Lichému, Ph.D., za odborné vedení práce, vlídný a profesionální přístup, ochotu, cenné připomínky, rady a za projevenou trpělivost. Děkuji také konzultantovi panu Ing. Filipovi Radkovskému. Diplomová práce vznikla v rámci řešení projektů Studentské grantové soutěže SP2017/57 a SP2017/58.

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na kovové pěny, které se díky svým vlastnostem stále více využívají v různých průmyslových oborech. Kovové pěny jsou materiály, které mají ve své struktuře úmyslně vytvořené póry, které jim dodávají zcela výjimečné vlastnosti. Teoretická část práce popisuje charakteristické vlastnosti, jednotlivé slévárenské možnosti výroby, oblasti a užití těchto kovových pěn v průmyslu. V experimentální části práce se provádí ověření a realizace zvolené metody Lost Foam k výrobě kovových pěn s pravidelnou buněčnou strukturou v provozních laboratořích školy.

Klíčová slova

Kovová pěna, pórovitost, hliníková pěna, výroba kovové pěny, lost foam, absorpce nárazové energie, lehké konstrukce.

Abstract

The diploma thesis is focused on metal foams that are due to their properties are increasingly used in various industrial fields. Metallic foams are materials that have intentionally created pores in their structure, that give them extraordinary characteristics. The theoretical part describes characteristic features, individual foundry production possibilities, areas and use of these metal foams in industry. In the experimental part of the work is performed verification and implementation of the chosen method is carried out lost foam to produce metal foams with regular cellular structure in the operating laboratories of the school.

Keywords

Metal foam, porosity, aluminium foam, production of metal foam, lost foam, absorption of impal energy, light construction.

Obsah

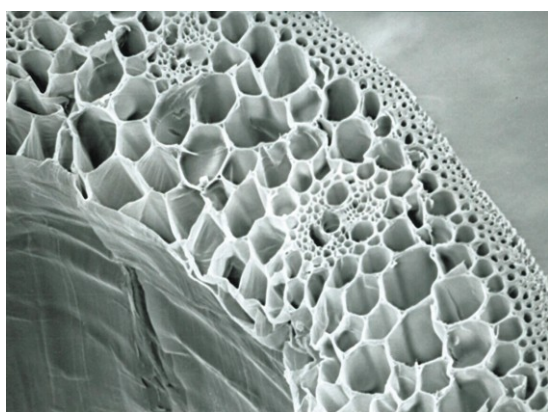
I. TEORETICKÁ ČÁST	10
1 Úvod.....	10
1.1 Cíl práce	12
2 Hliník	13
2.1 Výroba hliníku	13
2.2 Fyzikální vlastnosti hliníku	13
2.3 Použití hliníku	14
3 Kovové pěny.....	15
3.1 Vlastnosti kovových pěn	17
3.2 Pórovitost	17
3.3 Mechanické vlastnosti kovových pěn	18
3.4 Fyzikální vlastnosti	19
3.5 Elektrická vodivost	19
3.6 Tepelná vodivost.....	19
4 Výroba kovových pěn	20
4.1 Slévárenské metody výroby kovových pěn.....	20
4.1.1 Lití na odpařitelný model	21
4.1.2 Metoda Lost Foam	22
4.1.3 Zalití výplňového materiálu s použitím prekurzorů	23
4.1.4 Materiály s mřížovou strukturou	25
5 Oblasti a aplikace použití kovových pěn	27
5.1 Automobilový průmysl	28
5.2 Lehké konstrukce.....	29
5.2.1 Stavební průmysl	30
5.2.2 Lodní průmysl	30
5.2.3 Lékařský průmysl	31
II. PRAKTICKÁ ČÁST	32
6 Výroba kovové pěny metodou LOST FOAM	33
6.1 Materiál na výrobu modelu	35
6.2 Předzpěnění materiálu	35
6.3 Výroba modelu	36

6.4	Vypěňovací formy	36
6.5	Vtoková soustava.....	36
6.6	Povrchová ochrana modelu	37
6.7	Formovací materiál	38
6.8	Srovnání výhod a nevýhod technologie Lost Foam	39
7	Postup výroby kovové pěny v laboratorních podmínkách	41
7.1	Výroba modelu	41
7.1.1	Lepení oboustrannou páskou.....	42
7.1.2	Lepení modelů	43
7.1.3	Vtoková soustava.....	44
7.1.4	Zářezy	47
7.1.5	Rozváděcí kanál.....	47
7.1.6	Vtokový kůl.....	47
7.1.7	Povrchová ochrana modelu	48
7.1.8	Formování	50
7.1.9	Tavicí pec	52
7.1.10	Použitá slitina AlSi10	52
7.1.11	Měření teploty taveniny	53
7.1.12	Odlévání	54
7.1.13	Odlité odlitky.....	54
7.1.14	Vyhodnocení odlitků.....	56
8	Závěr	60
9	Seznam použité literatury.....	61
10	Seznam obrázků.....	65

I. TEORETICKÁ ČÁST

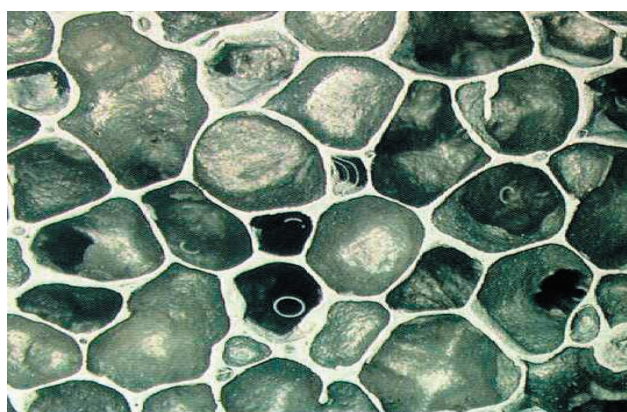
1 Úvod

Přestože se v současné době používají různé porézní materiály, a to zejména na izolační účely, výrobu filtrů nebo různých obalů, lze si jen stěží představit, že se tyto materiály díky své poréznosti dají efektivně využít i ke konstrukčním účelům. V přírodě se ale vyskytuje množství porézních organických stavebních látek, jako jsou např. dřevo, kosti, korály apod., které se po celá staletí znamenitě osvědčily, protože jsou schopny přenášet velké mechanické namáhání. Tyto velice lehké materiály díky své celulární struktuře mají neobyčejně vysokou tuhost. Při jejich mechanickém zatížení se přenášená napětí optimálním způsobem rozloží v konstrukci, která je z nich vytvořena, přičemž nedochází k zbytečnému nadměrnému namáhání konstrukce její vlastní tíhou. Jak je patrné z obr. č. 1, 2, příroda dokáže často vytvořit i natolik důmyslné vysoce porézní konstrukce, které umožňují např. ptákům létat, slonům běhat nebo vysokým stromům odolávat silnému větru. Příroda to dělá jednoduše tak, že umístí materiál tam, kde je ho potřeba, a zbytek nechá vyplněný vzduchem. Lidé se v historii často snažili napodobovat přírodu a využívat tak dobře osvědčené přírodní principy k dosahování technického pokroku. Ne jinak je tomu i v současné době, kdy se stále častěji ke konstrukčním účelům začínají používat lehké průmyslově vyráběné materiály, které se svou strukturou podobají organickým stavebním látkám.



Obrázek 1: Celulární struktura rostlinné stopky

Zdroj: [5]



Obrázek 2: Struktura pěnového hliníku

Zdroj: [5]

Dnes se už běžně vyrábějí různé polymerní a keramické celulární materiály, které mají dobré tepelně-zvukoizolační vlastnosti a jsou schopny při své deformaci spotřebovat velké množství

energie. Vzhledem k tomu se používají zejména jako izolátory nebo obaly. Jejich hromadnému využívání ke konstrukčním účelům však brání nedostatečná tuhost polymerů (nízký modul pružnosti) nebo velká křehkost keramiky. Nejperspektivnějšími v současnosti vyvíjenými vysoce porézními materiály jsou proto kovové pěny [5].

Kovová pěna (obr. 3) je materiál, jehož základ tvoří kov, nejčastěji se jedná o hliník, který je vylehčen vzduchovými bublinami a svou porézní strukturou tak připomíná kostní tkáň (obr. 4, 5) [31].



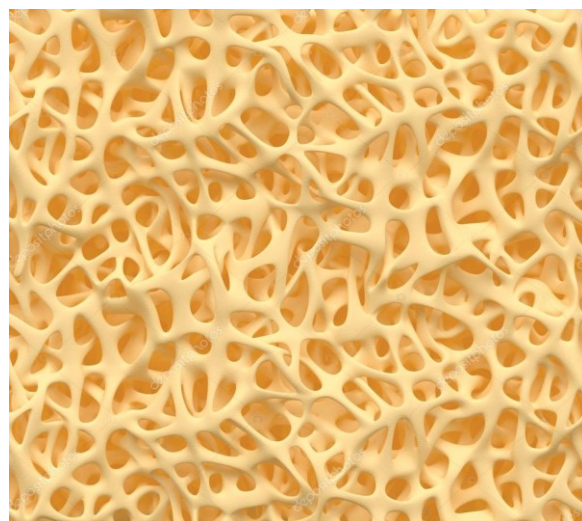
Obrázek 4: Hliníková pěna

Zdroj: [31]



Obrázek 3: Kostní struktura

Zdroj: [29]



Obrázek 5: Detail kostní struktury

Zdroj: [30]

1.1 Cíl práce

Cílem této práce je ověření výroby kovových pěn z hliníkových slitin s pravidelnou buněčnou strukturou pomocí metody Lost Foam v provozních laboratorních podmínkách školy. Teoretická část práce se zaměřuje na obecný popis kovových pěn jakožto materiálů s porézní strukturou, možnosti jejich slévárenské výroby a dále možnosti použití těchto materiálů. V praktické části práce je podrobně popsána zvolená technologie Lost Foam, dále jednotlivé kroky výroby kovové pěny od přípravy modelu, formování až po samotné odlévání, včetně následného vyhodnocení odlitků.

2 Hliník

Hliník je lehký kov, bělavě šedé barvy. Je kujný a slévatelný, využití čistého hliníku pro účely slévání je však pro jeho nízké pevnostní vlastnosti nízké. Je třetím nejvíce zastoupeným prvkem v zemské kůře, jeho obsahy se odhadují na 7,5–8,3 %. Je rozpustný ve zředěných kyselinách, hydroxidy alkalických kovů jej rozpouští za vzniku hlinitanů [1].

2.1 Výroba hliníku

Základní surovinou pro výrobu hliníku je bauxit. Bauxit je hydratovaný oxid hlinitý s obsahem oxidů železa, křemíku a titanu, ve kterém bývá obsah Al_2O_3 kolem 50 %. Z bauxitu se hliník získává elektrolyzou roztoku oxidu hlinitého v roztavených fluoridech. Celý výrobní proces je poměrně dosti složitý a sestává ze dvou zásadních etap:

- výroby oxidu hlinitého z hlinitanových rud – proces zahrnuje mletí, chemické zpracování hlinitanových rud loužením a následné žíhání při teplotě 1200–1300 °C;
- redukce oxidů na kovový hliník elektrolytickým způsobem z elektrolytu, kterým je roztavený kryolit (Na_3AlF_6) a v něm rozpuštěný oxid hlinitý (Al_2O_3), při teplotě 950–970 °C.

Výroba hliníku z primárních surovin je energeticky velmi náročná. K výrobě 1 t hliníku se spotřebuje asi 4 t bauxitu, přibližně 20 GJ tepelné energie a asi 14 MWh elektrické energie. Získaný hliník má vysokou čistotu až 99,9 %.

2.2 Fyzikální vlastnosti hliníku

- hustota 2700 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$;
- teplota tání 660 °C;
- teplota vypařování 2520 °C;
- krystalická mřížka kubická plošně centrovaná;
- mřížková konstanta $a = 4,05\cdot 10^{-10}\text{ m}$;
- atomové číslo 13;
- atomová hmotnost 26,98.

Významnými fyzikálními vlastnosti hliníku jsou vysoká tepelná a také elektrická vodivost, která činí při čistotě 99,99 % asi 60 % vodivosti mědi a vlivem přísadových prvků výrazně klesá [2].

2.3 Použití hliníku

Hliník je přítomen ve všem, co nás obklopuje. Je nejen třetím nejrozšířenějším prvkem na zemi, ale provází nás také v každodenním životě při všem, co děláme tj. od budíku, přes zubní pasty, spreje, folie až po cestu do práce autem či autobusem. Hlavní oblasti použití hliníku v současné době: doprava, stavebnictví, strojírenský a hutnický průmysl, energetika a elektrotechnický průmysl, chemický průmysl, rekreační průmysl, sport a jiné oblasti použití (např. klenotnictví) [3].

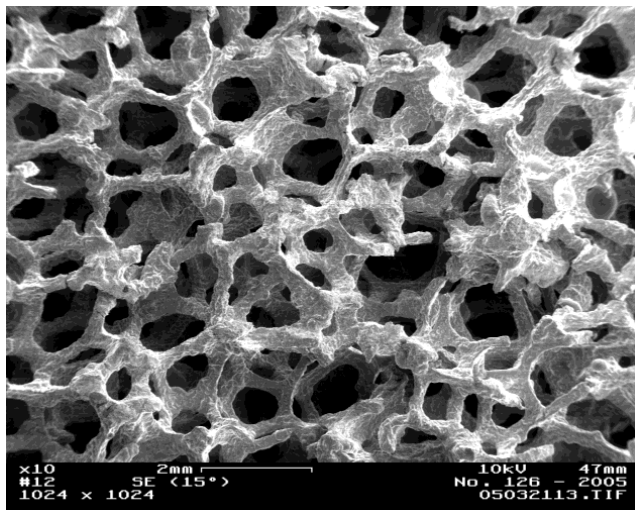
3 Kovové pěny

Kovové pěny představují porézní materiál s celulární neboli buňkovou strukturou. Skládají se z kovového skeletu a pórů vyplněných plynem, přičemž póry tvoří více než 70 % celkového objemu materiálu. Díky buňkové struktuře dosahují vysoké pevnosti vzhledem k nízké měrné hmotnosti, mají perfektní absorpci nárazové energie, značnou schopnost izolace zvuku a také tepelnou stabilitu. Charakteristika pórů zásadním způsobem ovlivňuje vlastnosti těchto pěn, hlavně jejich tvar, velikost, ale rovněž orientaci pórů a hloubku stěn [4].

Ze všech kovových pěn má v současnosti největší uplatnění hlavně pěnový hliník a jeho slitiny. I když se kovové pěny dají poměrně jednoduše vyrobit i z jiných kovů, jako jsou např. zinek, olovo, nikl, železo, měď, titan, hořčík a jiné, zůstává hliník z více důvodů právě nejperspektivnější, a to hlavně kvůli své nízké měrné hmotnosti, nízké teplotě tavení, vysoké tuhosti a houževnatosti a rovněž dobré korozní odolnosti. Tyto přednosti ho předurčují k výrobě porézní struktury s významnými konstrukčními aplikacemi [5].

Podle vnitřní struktury můžeme kovové pěny rozdělit do těchto základních kategorií:

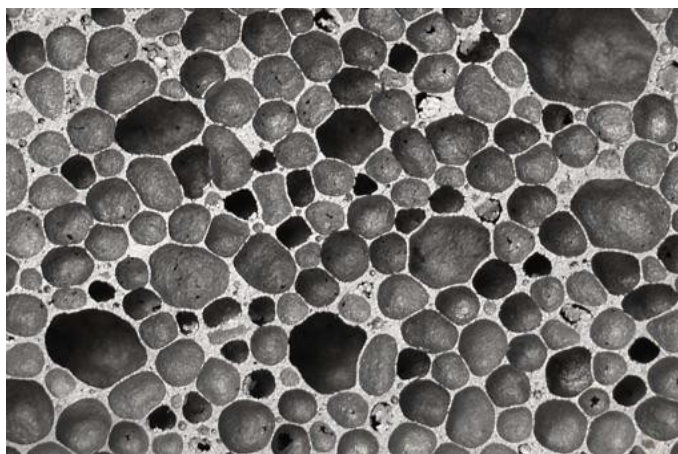
- s otevřenými póry (obr. 6), známé též jako „kovové houby“, mají mnoho možností uplatnění včetně tepelných výměníků, pohlcovačů energií a lehké optiky,



Obrázek 6: Kovová pěna s otevřenými póry

Zdroj:[6]

- s uzavřenými póry (obr. 7) – jsou primárně používané k adsorpci nárazů podobně jako např. polymerové pěny v cyklistických helmách, jsou schopné snášet vyšší nárazy. Tyto pěny jsou schopné plavat na vodní hladině,



Obrázek 7: Kovová pěna s uzavřenými póry

Zdroj: [6]

- s pravidelným uspořádáním pórů (obr. 8) – struktura pěny má pravidelné uspořádání,



Obrázek 8: Kovová pěna s pravidelným uspořádáním pórů

Zdroj: [6]

- se stochastickým uspořádáním pórů (obr. 9) – rozmístění pórů ve struktuře je náhodné. Toto uspořádání má většina kovových pěn, což je způsobené technologiemi jejich výroby [6].



Obrázek 9: Kovová pěna se stochastickým uspořádáním pórů

Zdroj: [32]

3.1 Vlastnosti kovových pěn

K hlavním výhodám těchto materiálů patří jejich neobvyklá kombinace vlastností, jako jsou vysoká tuhost a zároveň nízká hustota, dobrá tepelná vodivost a adsorpce nárazové energie.

Jednotlivé vlastnosti kovových pěn závisí na:

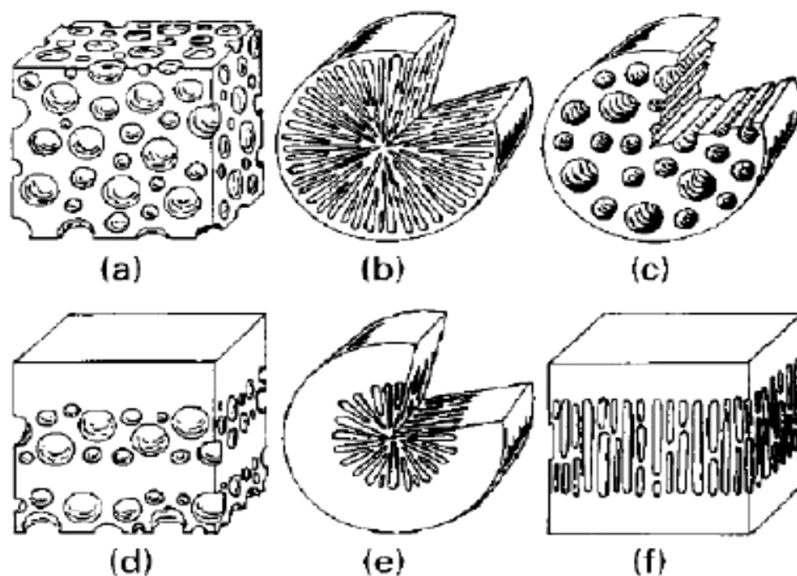
- morfologii: typu pórovitosti (otevřené nebo uzavřené póry), požadované porezitosti materiálu, velikosti a tvaru pórů a na celkové vnitřní ploše porézního materiálu,
- metalurgii: druhu kovu či slitiny nebo mikrostruktury,
- zpracování: možnosti vytváření pěn nebo pravidelných buněčných materiálů nebo výrobě kompozitů mezi pěnamí a plnými profily,
- ekonomice: nákladech a vhodnosti pro velkosériovou výrobu [7].

3.2 Pórovitost

Existuje řada parametrů, které blíže určují vlastnosti daného porézního materiálu. Mezi ty hlavní patří: stupeň pórovitosti, průměr pórů, objem jednotlivých buněk nebo kanálků, tvar, stupeň propojení pórů, chemické složení slitiny a její vlastnosti.

Orientace pórů, jejich velikost, tvar a stupeň propojení určují výsledné vlastnosti materiálu, nejvíce pak tepelnou vodivost, schopnost tlumit nárazy a pohlcovat energii. Hodnota pórovitosti a samotná orientace pórů (obr. 10) je závislá na použité technologii, proto se její

hodnota může pohybovat od 40 % do 98 %. Výše této hodnoty určuje, jaké procento zaujímají všechny póry z celkového objemu výrobku [8,9].



Obrázek 10: Tvary a rozmístění pórů; a) kulaté póry, b) radiální, c) válcové, d) až f) lamelární rozložení

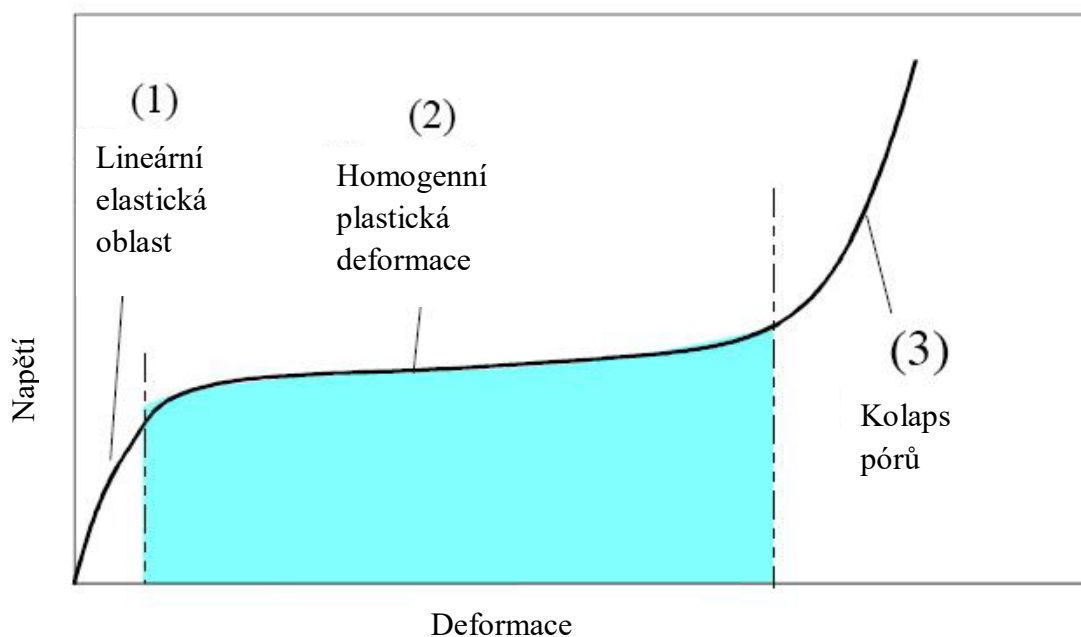
Zdroj: [8]

3.3 Mechanické vlastnosti kovových pěn

Díky porézní struktuře mají kovové pěny při zkouškách jiné chování ve srovnání s konvenčními kovy, a proto nemůžou být použity běžné testovací metody. Nejvýznamnější metodou ke zkoušení kovových pěn s relativními výsledky je tlaková zkouška, jejímž výsledkem je křivka závislosti napětí na deformaci (obr. 11), a to jak pro otevřenou, tak i uzavřenou strukturu pěny [10].

Tuto křivku je možno rozdělit na tři hlavní oblasti:

- lineární elastická oblast – v této oblasti dochází k přibližně lineárnímu nárůstu napětí s rostoucí deformací, probíhá pružná deformace stěn pórů,
- oblast plastického kolapsu struktury, zde dochází k trvalé deformaci a lámání stěn pórů,
- oblast zhuštění pěny, kde probíhá prudké zvýšení zatížení po tom, jak byly póry deformované a stlačené k sobě [11].



Obrázek 11: Diagram závislosti napětí na deformaci kovové pěny

Zdroj: [10]

3.4 Fyzikální vlastnosti

Fyzikální a chemické vlastnosti kovových pěn se odlišují od konvenčních, což však vytváří prostor pro jejich využití v rozmanitých technických aplikacích.

3.5 Elektrická vodivost

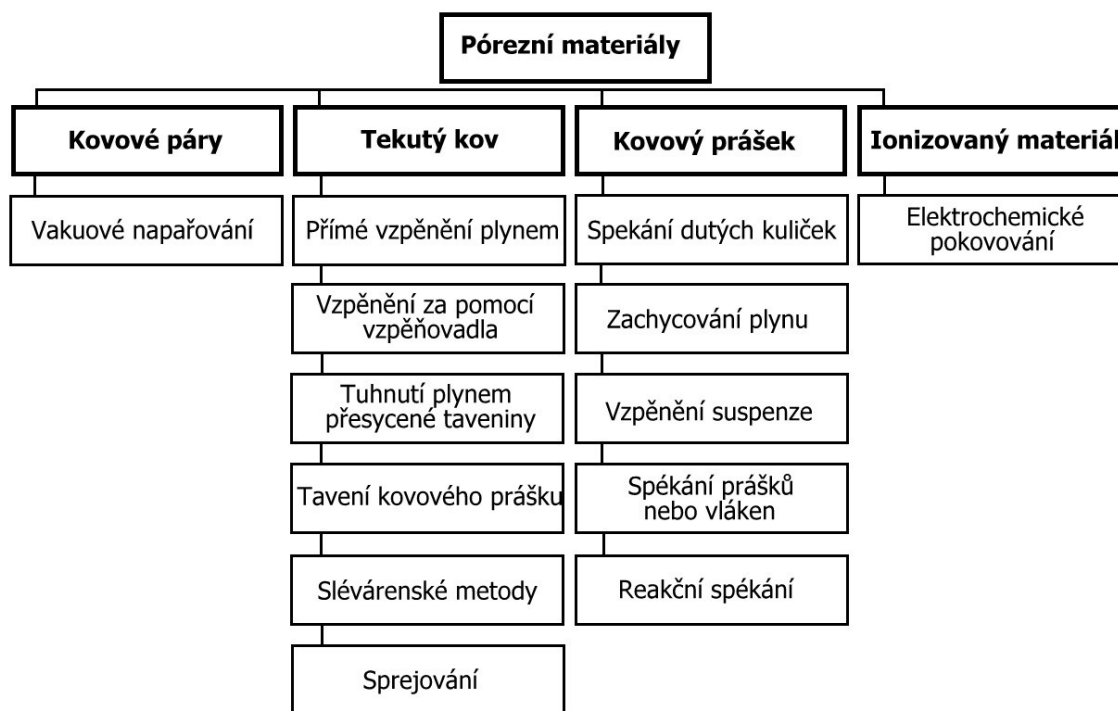
Elektrická vodivost kovových pěn je nižší než kovů, z kterých jsou vyrobené, a to z důvodu nevodivosti pórů obsahujících plyn. I v případě, že je redukována, je stále adekvátní pro poskytnutí dostatečné schopnosti elektrického uzemnění a stínění elektromagnetického záření [10].

3.6 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost kovových pěn je řádově vyšší než jejich nekovové ekvivalenty, tedy obecně nejsou vhodné na jednoduchou tepelnou izolaci, naproti tomu jsou schopné poskytnout jistou úroveň požární ochrany. Vodivost pěn s uzavřenou strukturou je 8- až 30násobně nižší ve srovnání s hustým materiálem, tvořeným stejnou slitinou. Naopak pěny s otevřenou strukturou je možné použít na výrazné zlepšení přenosu tepla v tepelných výměnících [10,11,13].

4 Výroba kovových pěn

Výrobní postupy kovových pěn můžeme rozdělit do čtyř základních skupin (obr. 12), a to podle stavu, ve kterém je kov zpracováván. Pórovité kovové materiály je možno vyrábět z taveniny kovu, z kovového prášku, z par kovů nebo z ionizovaného kovu [7].



Obrázek 12: Způsoby výroby kovových pěn

Zdroj: [7]

4.1 Slévárenské metody výroby kovových pěn

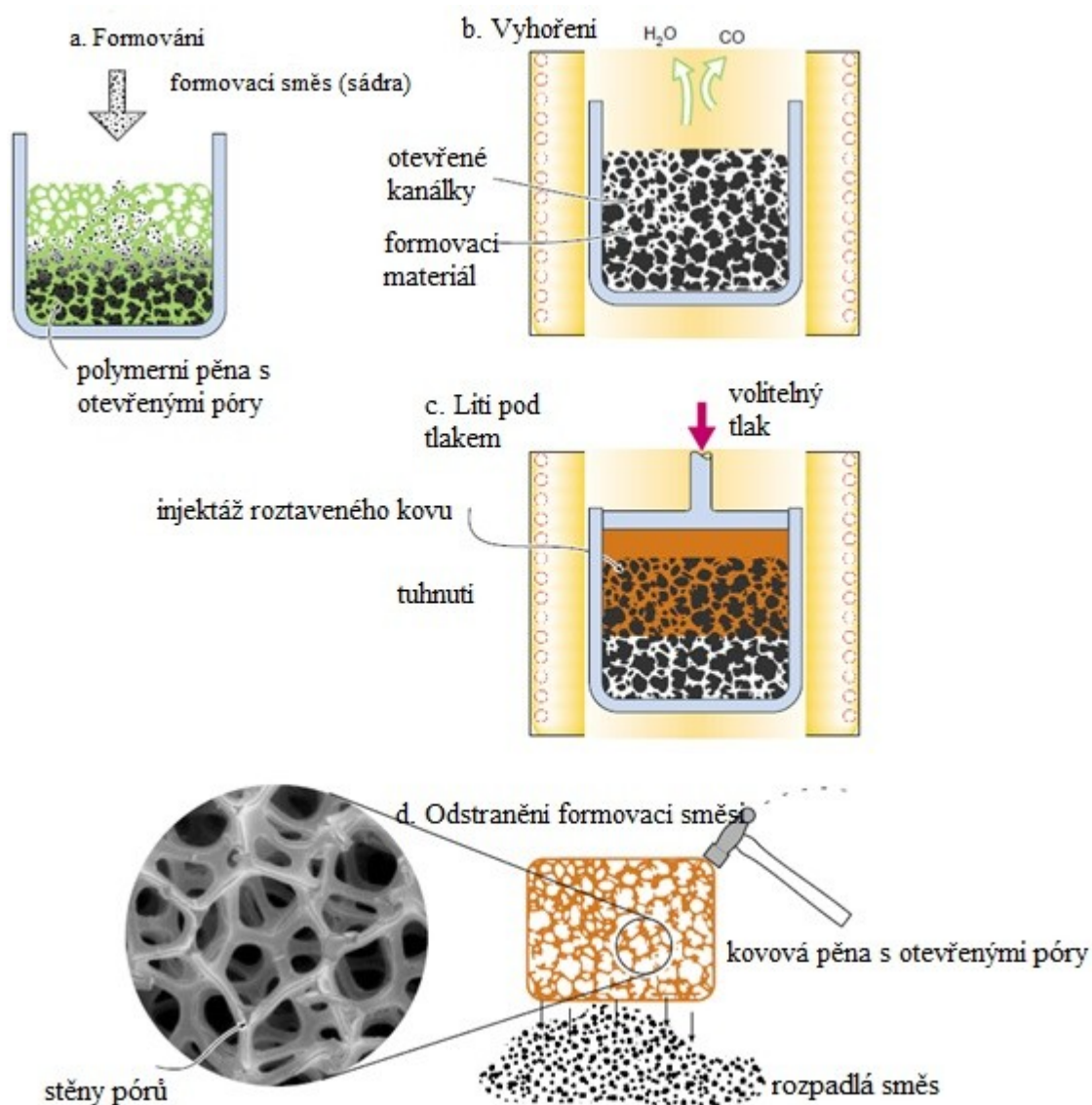
Slévárenské metody se používají k výrobě kovových pěn, a to s pravidelnou i nepravidelnou strukturou. V současnosti se používají tyto tři hlavní způsoby:

- k výrobě odlitků s nepravidelnou strukturou se používá technologie s využitím prekurzorů,
- k výrobě odlitků s nepravidelnou strukturou se využívá technologie lití na odpařitelný model,
- k výrobě odlitků s pravidelnou strukturou se zhotovuje modelové zařízení s požadovanou strukturou.

Výhodou slévárenských metod výroby kovových pěn je výroba tvarově složitých odlitků, možnosti volby pórovitosti a rozměru buněk. Tyto slévárenské metody jsou ve většině případů používány k výrobě kovových pěn, a to s otevřenými buňkami, jelikož je nutné odstranit materiál, který sloužil jako nosná kostra pro vytvoření požadované struktury. Existuje zde i možnost výroby pěn s uzavřenými buňkami, avšak za předpokladu, že materiál tvořící dané buňky zůstává v odlitku. K vytvoření materiálu s uzavřenými buňkami se více uplatňuje technologie přímého zpěnění plynem [12,13].

4.1.1 Lití na odpařitelný model

Tohoto způsobu se využívá pro výrobu kovové pěny s otevřenými póry, která kopíruje tvar polymerní pěny. Otevřené dutiny polymerní pěny se vyplní materiálem, který má dostatečnou žáruvzdornost, může to být například sádra nebo směs mulitu, fenolové pryskyřice a uhličitanu vápenatého. Dále následuje ohřátí formy na 700 °C za účelem vyžhání sádry a spálení polymerní pěny. Vzniklé dutiny zaplní tekutý kov, který tak zkopíruje strukturu polymerní pěny. Chceme-li zvýšit zabíhavost, můžeme použít kombinace vakuového a tlakového lití a předeřívání formy. Jakmile se odstraní sádra, získáváme kovovou pěnu, která je přesnou kopií polymerní pěny. Proces výroby znázorňuje obr. 13 [14].

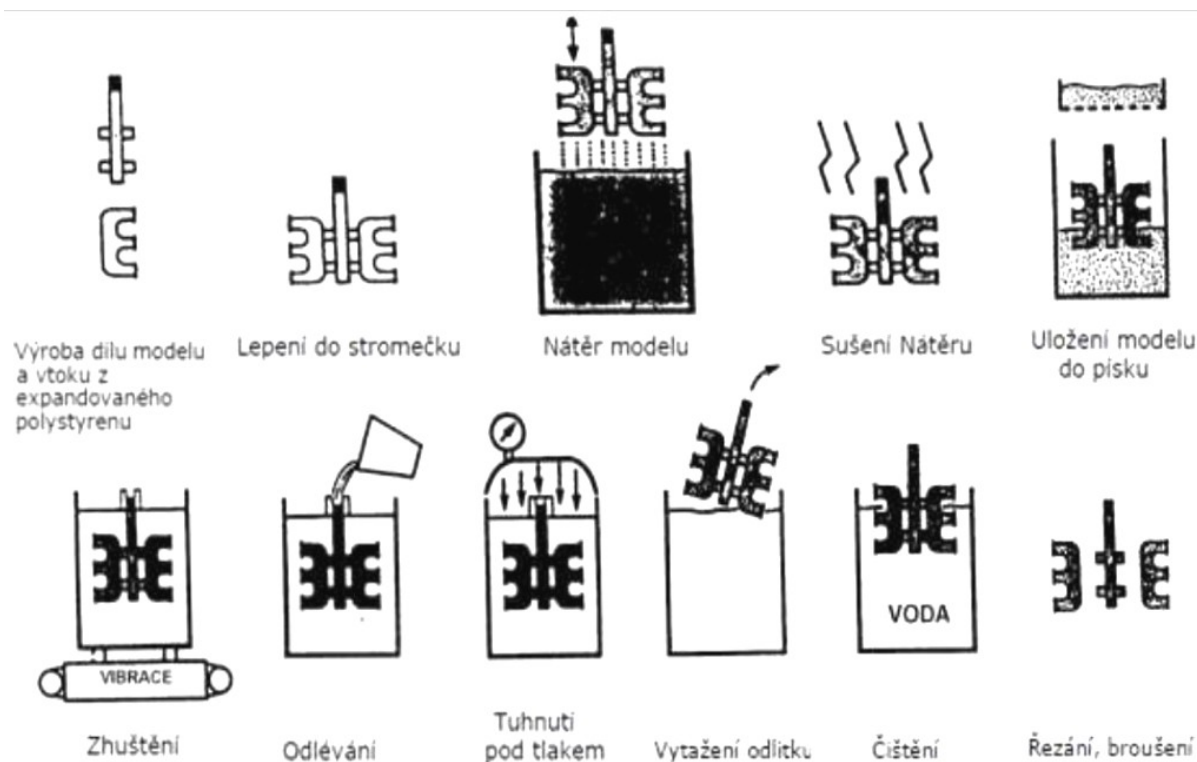


Obrázek 13: Výroba kovové pěny s pomocí polymerní pěny

Zdroj: [15]

4.1.2 Metoda Lost Foam

Při této technologii, tzn. metoda spalitelného, odpařitelného modelu (obr. 14), se zhotovuje model odlitku z pěnového polystyrenu, který se ukládá do formy se suchým křemenným ostřivem, kde pomocí vibrací dojde k zhuštění formy. V případě této metody se forma nepěchuje, pouze se zasypává suchým ostřivem. Polystyrenový model se ponechává ve formě až do odlévání. Tato technologie umožňuje výrobu unikátních odlitků, kdy je zapotřebí pouze jednoho kusu. Z těchto důvodů se výrazně snižují náklady na výrobu a skladování dřevěných modelů. Povrch modelu je nutno opatřit ochranným nátěrem z důvodu zabránění penetraci kovu [16].



Obrázek 14: Metoda odpařitelného modelu

Zdroj: [17]

4.1.3 Zalití výplňového materiálu s použitím prekurzorů

Tato metoda je založena na odlévání tekutého kovu do dutiny formy, která je vyplněna anorganickými, nebo organickými granulemi (prekursory). Je také možné granule přidávat přímo do taveniny. Granule mohou v odlitku zůstat (tzv. syntaktická pěna), nebo se naopak odstraňují loužením a žiháním. Odstraňování granulí je možné pouze tehdy, jestliže je jejich obsah tak velký, že se všechny dotýkají.

Jako plnivo slouží vermikulit, vypálené hliněné kuličky, kuličky písku s pojivem, sůl a duté kuličky oxidu hlinitého [7].

Jako organický výplňový materiál je možné uplatňovat polymerní kuličky. Hliník se při této metodě rychle vstříkne do formy obsahující částice polystyrénu, které jsou obalené vrstvou pryskyřice, a kov ztuhne dříve, než dojde k rozložení polystyrénu. Injektáž kovu do dutiny formy je nutné provádět pod tlakem, aby kov mohl proniknout do pórů velmi rychle (během časového limitu 0,2 vteřiny), dříve než dojde k rozložení polystyrénu. Pórovitost dosahuje řádově 73 až 86 % a rozměr pórů se pohybuje mezi 1 až 3 mm. Kompozitní materiál, jenž se skládá z kovu, polystyrénu a pryskyřice, se umístí do pece s teplotou přibližně 400 °C po dobu několika minut k odstranění polystyrenu a pryskyřice [18, 7].

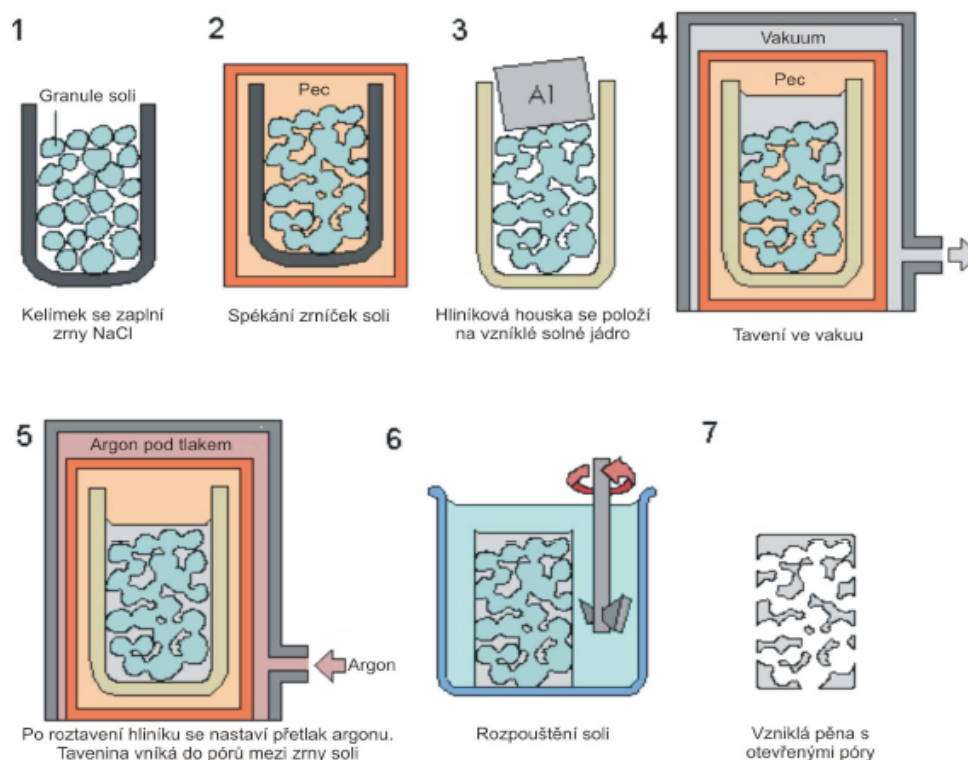
Pěna vytvořená s pomocí kuliček prekursoru vykazuje nepravidelně rozložené póry – tzv. stochastickou strukturu.

Dalším možným postupem výroby kovové pěny je metoda, která byla vyvinuta ve švýcarském federálním technologickém institutu a jež spočívá v použití preformy rozpustné ve vodě.

Postup této metody: forma se zaplní materiálem, který je rozpustný ve vodě a který odolá teplotě roztaveného kovu. Pro tyto účely se používá kamenná sůl (z důvodu nízké ceny), která se střešá ve formě, dokud se nedosáhne požadované hustoty (obr. 15). Následně se sůl speče a ochladí (2). Natavením a slepením zrn soli v místech kontaktů se vytvoří pevný celek ze soli, který kopíruje tvar dutiny formy s otevřenými kanálky v místech mezi zrny (3). Při nejjednodušším možném postupu se roztavený hliník nalije do formy a zaplní kanálky. Odlitek se poté vyndá z formy, ochladí se a ponoří do vody, aby se sůl rozpustila (6). Takto se odlévá pěna s otevřenými póry, které odpovídají granulím soli (svou velikostí a rozložením), místo nichž vznikly. Minimální velikost pórů je přibližně 1 mm, pórovitost řádově mezi 60–85 %.

V případě použití jemného solného prášku se využívá zvýšeného tlaku pro infiltraci soli hliníkem. Preforma ze soli se udržuje ve vakuu, dokud se hliník natavuje na jejím povrchu, (4) a při nadcházející infiltraci místo vakua působí vysoký tlak inertního plynu (5). Sůl se odstraňuje rozpouštěním ve vodě (6) a vzniká pěna s otevřenými póry (7).

Touto metodou jsou vyráběny vysoce kvalitní pěny o velikosti pórů 50 μm až 5 mm, nevýhodou je ale časová náročnost a také vysoká nákladovost, jelikož metoda obsahuje mnoho operací [18].



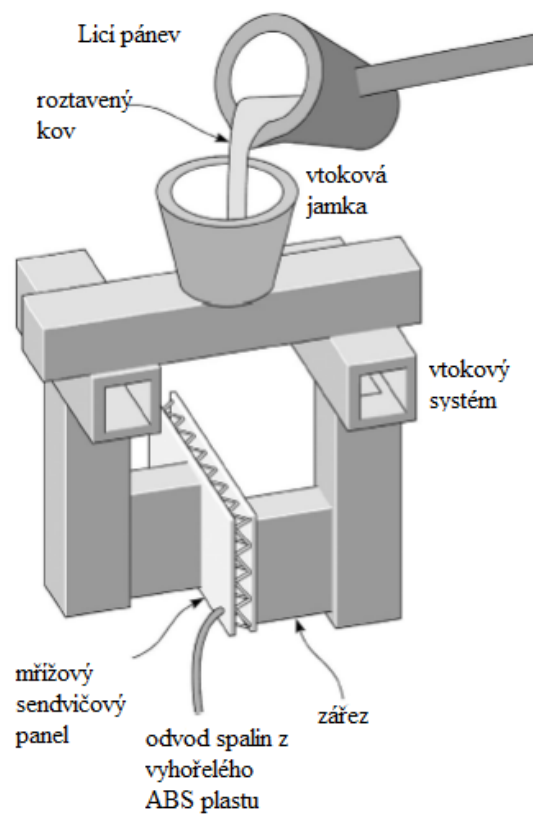
Obrázek 15: Výroba kovové pěny s otevřenými póry použitím preformy rozpustné ve vodě

Zdroj: [18]

4.1.4 Materiály s mřížovou strukturou

Materiály, které mají mřížovou strukturu, jsou vysoce porézním kovem s pravidelnou strukturou nazývanou „mřížka“, kde podíl kovu ve struktuře bývá menší než 20 %. Typickou vlastností těchto materiálů je pravidelná struktura, která se skládá ze stejných jednotlivých buněk, jejichž rozměry se pohybují od desítek mikrometrů až po desítky milimetrů. Pro tuto technologii výroby kovových materiálů s mřížovou strukturou se používá metoda lití na vytavitelný nebo spalitelný model. Používanými materiály jsou vosky nebo polymery, modely jsou pak vyráběny pomocí vstřikování nebo lepením jednotlivých součástí po vrstvách za použití lepidla (polystyrenové modely). Pro technologii odpařitelného modelu je hojně využíván model z ABS plastu (Akrylonitrilbutadienstyren), ten je připojen ke vtokové soustavě vyrobené z vosku. Soustava je jako celek následně obalená keramickou licí suspenzí a po jejím vytvrzení dochází k odstranění modelu žíháním. Vzniklá soustava se pak zaplní kovem [7,12,13].

Schéma výroby mřížové struktury s modelem z ABS plastu zachycuje obr. 16.



Obrázek 16: Schéma výroby kovové pěny z ABS plastu

Zdroj: [13]

V nejjednodušší formě mají mřížové panely vyrobené litím trojúhelníkový tvar buněk (obr. 17), který jim poskytuje pevnost a tuhost [19].



Obrázek 17: Mřížový odlitek ze slitiny hliníku

Zdroj: [19]

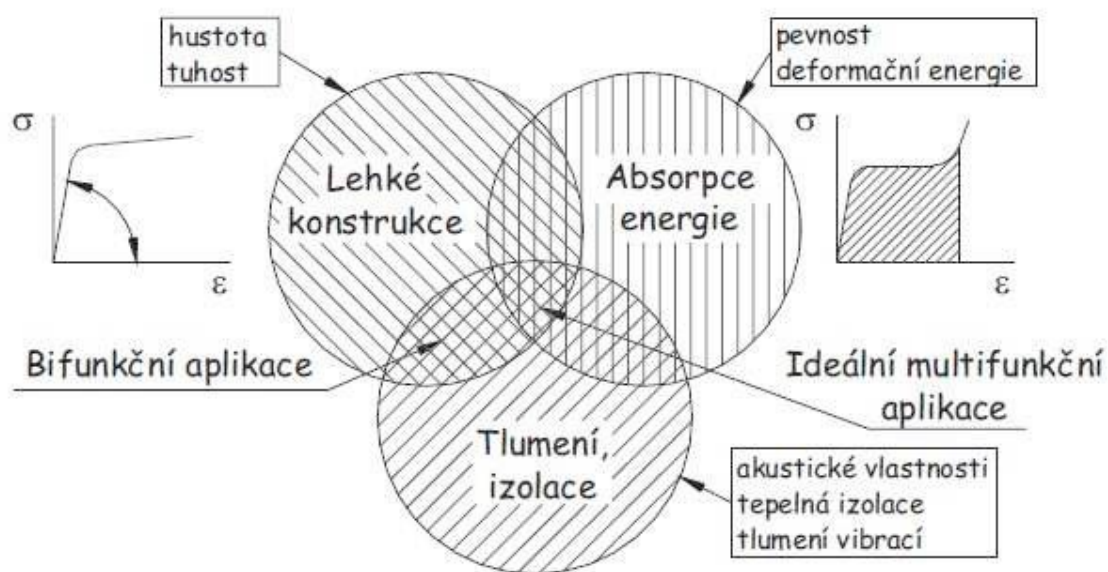
5 Oblasti a aplikace použití kovových pěn

V současné době nachází největší uplatnění pěnový hliník a jeho slitiny. Perspektivním celulárním konstrukčním materiálem je zejména z důvodu:

- své nízké hustoty ($\sim 2700 \text{ kg.m}^{-3}$),
- teploty tavení 660°C ,
- vysoké tuhosti, houževnatosti a především dostatečné korozní odolnosti.

Další důvody využívání pěnového hliníku představují nehořlavost, recyklovatelnost a zdravotní nezávadnost.

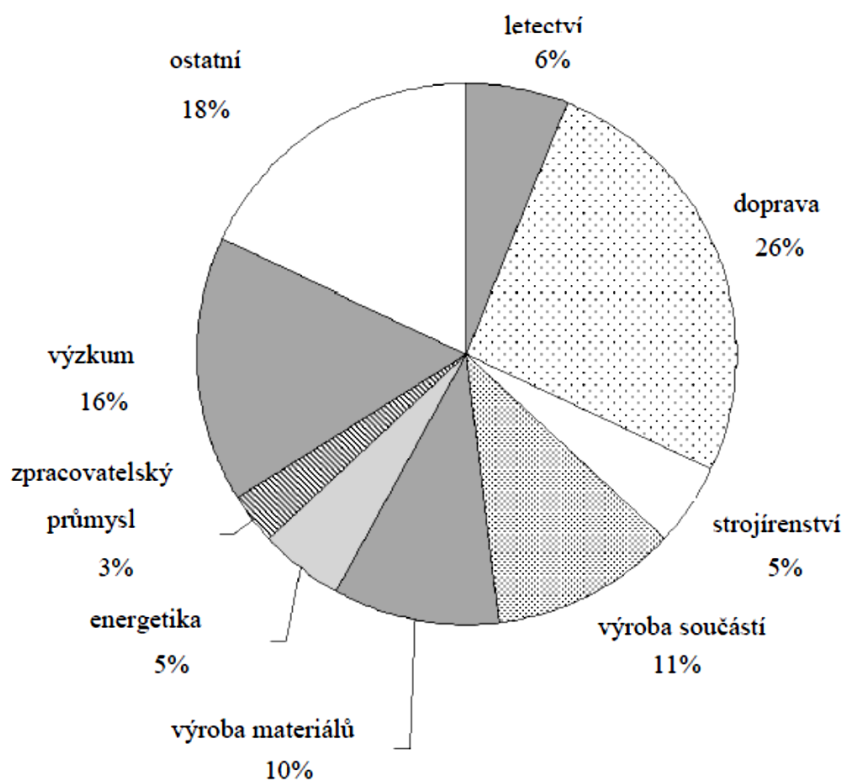
V ideálním případě jsou pro využití pěnového hliníku takové aplikace, kde se využívá více předností tohoto materiálu. Obr. (18) znázorňuje tři nejdůležitější přednosti pro většinu konstrukčních aplikací. V řadě případů postačí kombinace pouze dvou z nich [5].



Obrázek 18: Možnosti aplikace vyztuženého pěnového hliníku

Zdroj: [5]

Na níže uvedeném grafu (obr. 19) můžeme vidět, kde všude se lze setkat s kovovými pěnami. Největší zastoupení má kovová pěna v dopravě, především v automobilovém průmyslu [17].



Obrázek 19: Použití kovových pěn v průmyslu

Zdroj: [17]

5.1 Automobilový průmysl

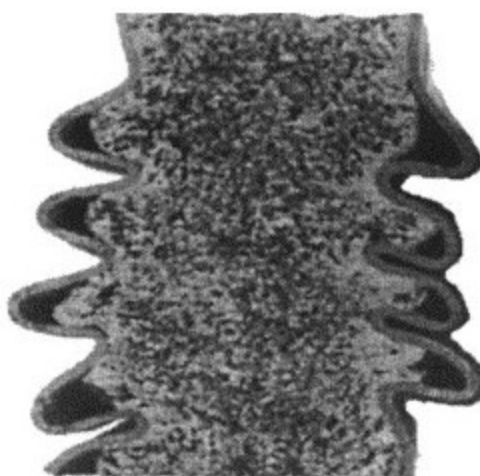
Typickým příkladem použití hliníkových pěn v automobilovém průmyslu je aplikace do deformačních zón automobilu (obr. 20), a to z důvodu využití jejich nízké hmotnosti při vysoké tuhosti, vysoké pórovitosti, schopnosti pohltit velké množství nárazové energie. Při nárazu se začínají jako první deformovat vrchní vrstvy buněk a až po jejich úplném zdeformování působí síla i na další vrstvu buněk. Díky tomuto procesu deformace vznikne obrovské stlačení, které je schopno absorbovat až 84 % energie nárazu. Obr. 21 znázorňuje ocelový rám, který je naplněný hliníkovou pěnou po deformaci, přičemž je známo, že kovové pěny mají největší schopnost absorpce energie na jednotku hmotnosti ve srovnání s jinými kovovými materiály.

Kromě již zmíněných deformačních zón vozidel se pohlcovače energie využívají i u jiných výtahových a dopravníkových zařízení či kabinách vojenských automobilů [19, 20].



Obrázek 20: Použití hliníkové pěny v deformační zóně automobilu

Zdroj: [19]



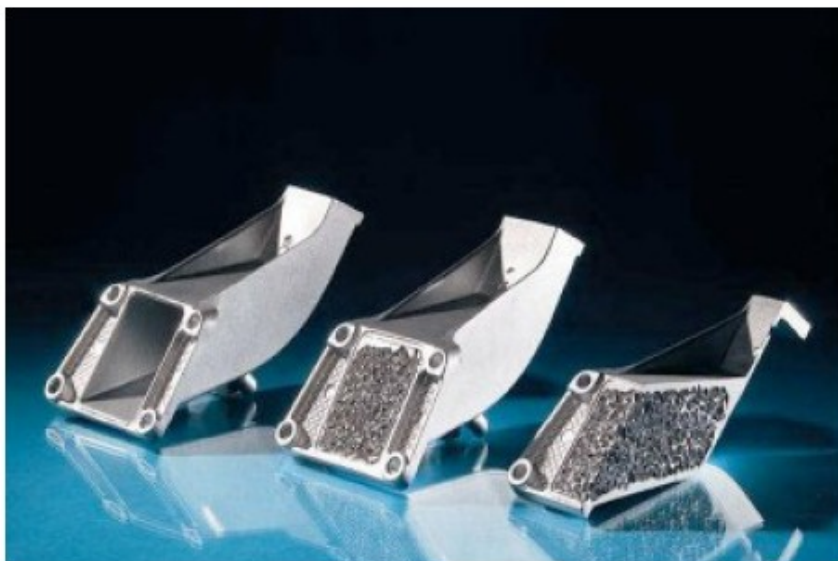
Obrázek 21: Rám s hliníkovou pěnou po deformaci

Zdroj: [20]

5.2 Lehké konstrukce

Použití pěnového hliníku v oblasti lehkých konstrukcí má obrovský potenciál. Vhodným způsobem povrchového vyztužení součástí z pěnového hliníku v místech, kde lze očekávat největší tahové namáhání, můžeme dosáhnout výrazného snížení hmotnosti při zachování požadovaných mechanických vlastností (obr. 22).

Pěnový hliník nachází uplatnění jako vnitřní část v sendvičových panelech, výplň trámových konstrukcí, trvalá jádra hliníkových odlitků aj. [5]



Obrázek 22: Model držáku motoru pro BMW, zleva dutý odlitek, odlitek s pěnovým jádrem, řez odlitek

Zdroj: [5]

5.2.1 Stavební průmysl

Stavební průmysl je další oblastí pro široké využití kovové pěny. V současné době je mnoho používaných materiálů příliš těžkých, případně jsou to materiály problematické z pohledu protipožární ochrany.

A právě použití pěnového hliníku pro výrobu protipožárních dveří se jeví jako velmi vhodné. Je tak možno využít relativně nízké tepelné vodivosti pěny a nízké hustoty čili malé hmotnosti. Hliníkové pěny jsou až překvapivě stabilní při kontaktu s otevřeným ohněm navzdory tomu, že je teplota tání hliníku poměrně nízká, a to 660 °C.

Z důvodu své nízké hmotnosti se mohou dále uplatnit v konstrukci výtahů, kde snížení hmotnosti se projeví klesající spotřebou energie nutné k provozu výtahu i energie nutné k zabrzdění výtahu ve vysokých budovách [7]

5.2.2 Lodní průmysl

Za účelem snížení emisí, odlehčení dopravnímu provozu a životnímu prostředí dochází v přístavních městech k většímu využívání nákladních lodí (tzv. kontejnerové taxi).

Jediná loď dokáže nahradit šedesát nákladních aut. Palivem pro tyto lodě je kapalný plyn, který má zabránit znečištění v případě úniku.

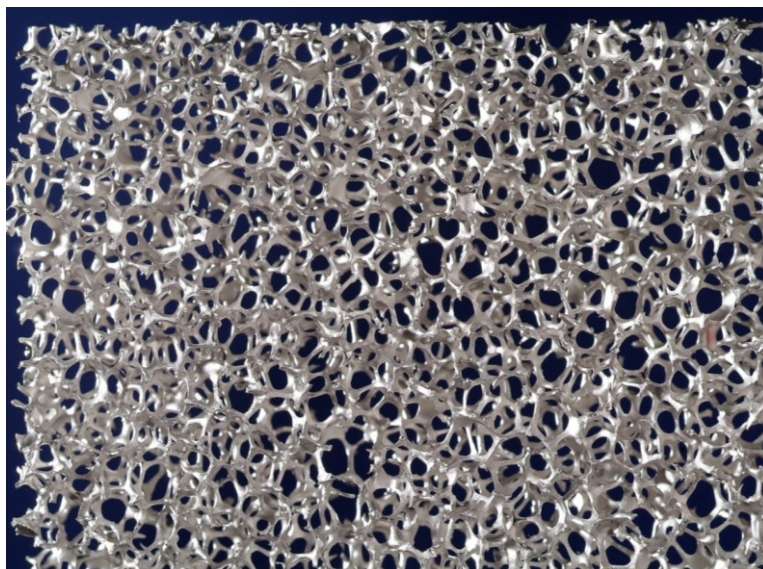
Jedním z hlavních problémů je jejich hmotnost, a proto inženýři hledají způsob, jak plavidlo odlehčit až o 30 %. Některé ocelové části lze nahradit superlehkým, ale zároveň pevným

materiálem – pěnou z hliníkových slitin. V rámci evropského projektu CREATING se v současné době výzkum zaměřuje konkrétně jen na některé části lodi. Úspora může být 20 až 25 % hmotnosti ve spodní sekci a na bočnicích 27 %. Sečte-li se veškerá hmotnost, váha lodi se může odlehčit o několik tisíc tun [21].

5.2.3 Lékařský průmysl

V oblasti lékařství se v poslední době rozvíjí využívání porézních materiálů. Jedná se o implantáty, kde je důležité, aby jejich konstrukce měla otevřené póry i vysoké mechanické vlastnosti [22].

Obr. 23 znázorňuje kovovou pěnu z titanu se složitou vnitřní strukturou, jež umožňuje krevním cévám a kostním buňkám pěnou prorůst. Pěna je flexibilní, ale přesto pevná jako lidské kosti, umožňující okamžitě nést zatížení. Nový druh titanového implantátu je podobný vnitřní struktuře kosti z pohledu konstrukčního uspořádání [23].



Obrázek 23: Kovová pěna z titanu

Zdroj: [23]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část této práce se zaměřuje na výrobu kovových pěn z hliníkových slitin s pravidelnou buňkovou strukturou v provozních laboratorních podmínkách. K výrobě kovové pěny byla zvolena technologie lití na jednorázový odpařitelný model, tzv. metoda Lost Foam. V praktické části je tato technologie podrobně popsána, dále jsou zde popsány jednotlivé kroky výroby od přípravy a lepení modelu, formování až po samotné odlévání, včetně následného vyhodnocení odlitků.

6 Výroba kovové pěny metodou LOST FOAM

První zmínky o možnostech použití polystyrénové pěny jakožto materiálu na výrobu modelů se datují do roku 1956. Iniciátorem této metody byl profesor H. F. Shroyer, který v roce 1958 získal patent na tuto technologii. Polystyrénový model byl v té době formován do formovacích směsí s pojivem (furanové směsi). V polovině 70. let došlo ve světě k prudkému rozvoji této technologie, postupem času tak došlo k odstranění pojiva ze systému, což je jedna z předností této metody. První průmyslový odlitek s hmotností 12 t byl vyroben v SRN roku 1962, v roce 1963 již tuto technologii používalo 35 sléváren v USA. Metoda je známa nejběžněji pod označením LOST FOAM, ale také jako EPC (Evaporative Pattern Casting), REPLICAST, GAMOLIV, CASTYRAL aj.

Technologii Lost Foam dělíme podle rozsahu výroby na dva postupy:

Odlévání jednotlivých kusů odlitků – malosériová výroba

- polystyrenový model se vyrábí pro jedno použití, a to frézováním, řezáním či lepením apod.,
- model se formuje do formovací směsi s pojivem,
- metoda je používána pro výrobu odlitků tvářecích a lisovacích náradí.

Velkosériová výroba odlitků

- polystyrenový model je vyráběn ve vypěňovací formě,
- model se pěchuje do suchého křemenného písku (bez pojiva),
- častější u drobnějších odlitků.

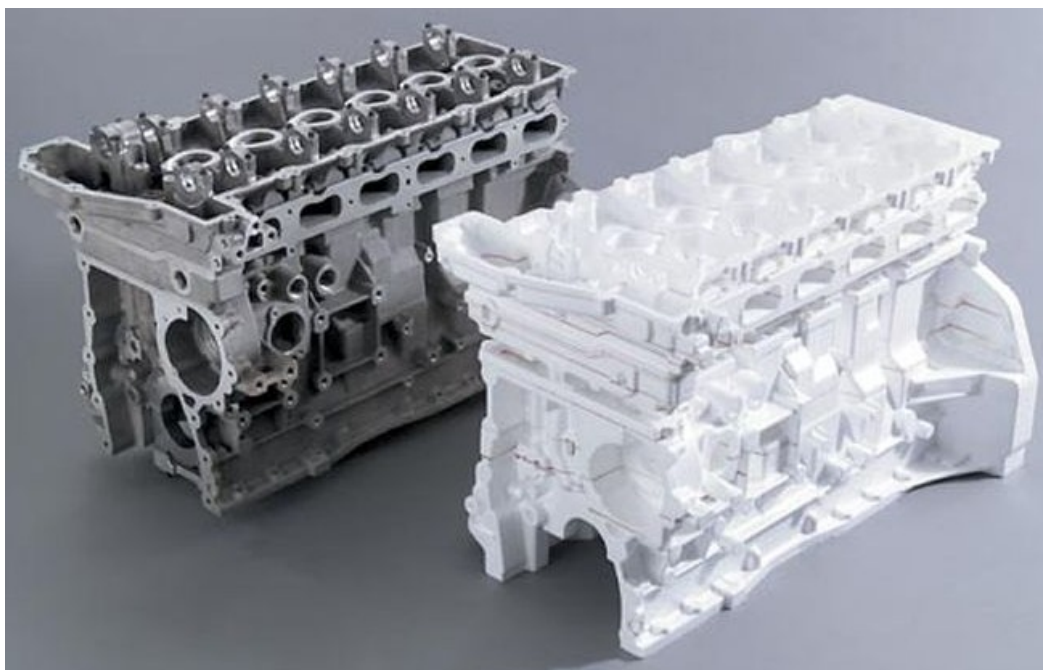
Existují také různé možnosti modifikace této technologie, např. postup „Castyrolverfahren“ používá lití v uzavřených nádobách s přetlakem 10 bar, který je udržován až do úplného ztuhnutí hliníkových odlitků. Tímto způsobem se dosáhne vyšších mechanických vlastností díky nižší pórovitosti odlitků. Postup „REPLICAST“ předpokládá model z pěnového polystyrenu opatřeného nátěrem, který je zasypán suchým křemenným pískem a po zhuštění vibracemi se forma připojí na vakuové čerpadlo, čímž vzniká podtlak, který pomáhá přidršet nátěr na stěně formy, zatímco model zplyňuje.

K nejdůležitějším parametrům technologie Lost Foam se řadí:

- prodyšnost nátěru,
- prodyšnost formy,
- hustota napěněného modelu,
- lící teplota,
- vtokový systém.

Výroba odlitků metodou Lost Foam (ztracené pěny) je výjimečná a specifická zároveň v tom ohledu, že odpadá klasické pískové hospodářství. Technologie používá pouze suché ostřívo – suchý křemenný písek bez pojiva. Po vychladnutí a odstranění prachových podílů je ostřívo připraveno k dalšímu použití. K přednostem této metody patří rozměrově přesné odlitky s minimální potřebou opracování povrchu, rychlá produkce modelů a odlitků. Odpařitelný model se v drtivé většině vyrábí ze směsi expandovaného polystyrenu a polymethylmetakrylátu, jehož cena je ekonomicky přijatelná. K nákladnějším technologickým zařízením patří vypěňovací zařízení, především formy určené na vypěňování modelů, které jsou ze speciálních materiálů. Nelze opominout i další nákladné vybavení, kterým je vzduchotechnika zajišťující přijatelné pracovní podmínky. Jedná se především o odplyňování forem, tj. vakuování v průběhu odlévání, neboť v důsledku termodestrukce modelu vzniká velké množství plynů, které je potřeba odsát.

Technologie Lost Foam se často uplatňuje pro rozměrově přesné odlitky (obr. 24), je hojně používána pro výrobu odlitků v automobilovém i strojném průmyslu, především jde o bloky, hlavy, ojnice a hřídele motorů automobilů, případně dalších složitých součástí [25].



Obrázek 24: Blok motoru: vlevo hotový odlitek, vpravo model z EPS, odlitek je přesnou kopií modelu

Zdroj: [26]

6.1 Materiál na výrobu modelu

Pro hliníkové slitiny se nejvíce používá expandovaný polystyren EPS. Pro ocelové odlitky a odlitky z litiny s lupínkovým grafitem se používá kromě již zmíněného EPS také PMMA (polymethylmetakrylát) nebo copolymer.

Polyakrylát se používá zejména v USA a Japonsku, nevýhodou tohoto materiálu je jeho vysoká cena. Cenově dostupnější je směs polyakrylátu s polystyrenem.

6.2 Předzpěnění materiálu

Polystyren je schopen expandovat díky přítomnosti pentanu (zvýšení teploty na 90–100 °C). Po zahřátí materiálu se přetlakem pentanu kuličky materiálu zvětší přibližně 30x v porovnání s původní velikostí. Díky předzpěnění se redukuje měrná hmotnost materiálu z původních 600 g/l na 15 – 20 g/l. Typická hmotnost pro EPS používaného pro polystyrenové modely se pohybuje mezi 20 - 26 g/l.

6.3 Výroba modelu

Model je vyráběn z kuliček polystyrenu se stejnou granulometrií s cílem dosáhnout zcela určité objemové hmotnosti. Čím je vyšší objemová hmotnost modelu, tím je povrch kompaktnější, ale zato má odlitek horší povrch. V případě výroby složitých modelů (s dutinami), když není možné použít jednu vypěňovací formu, se model sestavuje z jednotlivých částí (dvě nebo i více). Tyto části včetně vtokové soustavy se vzájemně lepí. V praxi je rozšířeno používání tavného lepidla s okamžitou pevností spoje.

6.4 Vypěňovací formy

Při návrhu a konstruování vypěňovacích forem je nutné dodržovat tyto zásady:

- minimalizace tepelných uzlů ve stěnách formy,
- optimalizace odvětrání formy pomocí propařovacích sítěk nebo odvětrávacích mezer – dobré odvětrání forem je důležité pro dobré vyjmutí hotového polystyrenového modelu především z formy, která není opatřena vyhazovači (vyjímání se provádí na jedné straně pomocí tlakového vzduchu a na straně druhé pomocí vakua),
- dokonale vyleštěný povrch formy usnadňuje vyjímání modelů z formy, důležité zejména u tvarově složitých modelů (např. žebrované statory elektromotorů),
- minimalizovat možnost kondenzace vody, nutné odsávání,
- snaha vytvořit co nejúplněji polystyrenový model vzhledem k budoucímu odlitku, neboť lepidlo lepených spojů zvyšuje množství zbytků uhlíku, což se projevuje zvýšenou zmetkovitostí odlitků,
- formy se vyrábějí výhradně z válcovaných nebo speciálně litých hliníkových slitin.

6.5 Vtoková soustava

Vtoková soustava je rovněž vyráběna z materiálu na modely, musí zaručovat vysokou rychlost lití (stoupání hladiny kovu), aby mezera mezi modelem a hladinou kovu byla co nejmenší. V případě pomalého lití roste mezera mezi kovem a modelem, kapalný styren stéká na tekutý kov a tvoří se lesklý uhlík, uhlíkaté blány a saze. Tyto produkty termodestrukce modelové hmoty zhoršují přivrácenou plochu odlitku k hladině kovu (zavalování). Lící systémy mají výrazný vliv na výslednou jakost. Odlitky je možné odlévat

dvěma základními způsoby, a to litím shora a litím na spodní vtoky. Vrchní vtoky jsou z důvodu odvodu plynů výhodnější. Od začátku lití je pro průchod plynů volná větší část plochy formy, hladina kovu je zásobena teplejším kovem, model se přívodem tekutého kovu zplyňuje rychleji. Nevýhodou je však členitost vtokové soustavy, která spolu se slepými výfuky ztěžuje pechování horního rámu, do kterého je celá vtoková soustava situována. Vyšší je i časová náročnost vlastní přípravy modelu a formování. Spodní vtoky jsou v praxi rozšířenější. Jejich nevýhoda souvisí s menší plochou pro odvod plynů (tvoří ji pouze volný prostor mezi stoupajícím kovem a ještě nezplyněným modelem). O to více se zdůrazňuje potřeba vysoké propustnosti plynů formovacích směsí a nátěrů. Časová náročnost aplikace spodních vtoků je v porovnání s horními vtoky nižší. V případě vyšších odlitků se používá boční zaústění vtoků. Optimální rychlost lití se pohybuje v rozmezí 1–5 cm/s.

6.6 Povrchová ochrana modelu

Sestavené modely se opatřují ochranným nátěrem, který musí být tenký, rovnoměrné tloušťky, kompaktní a prodyšný. Nanesení se provádí buďto namáčením (jedná se o drobné modely), či natíráním ručně – štětcem (především velké modely). Rovnoměrnost nanesení se kontroluje vážením modelu s nátěrem. Velmi důležité je jeho dokonalé vysušení, které se uskutečňuje při teplotě 50–60 °C. Modely se do zaformování skladují v temperovaných skladech. V podstatě se používají dva druhy nosných kapalin, tj. voda a líc. Exponovaná místa (různé kapsy, průchody, otvory apod.) se natírají dvakrát, přičemž první nátěr se použije pouze na exponovaná místa, druhý nátěr se aplikuje v celé ploše. Speciální nátěry obsahují oxidační přísady pro spalování pyrolýzních produktů (amorfní uhlík – saze a lesklý uhlík).

Rozlišujeme tyto základní typy nátěrů:

- kokso-grafitové – vhodné pouze pro menší tepelné zatížení, při delší časové expozici vyžadují silnější vrstvu nátěru až 3 mm,
- aluminosilikátové vodní – (vyvíjené pro metodu spalitelného modelu),
- zirkonové – vykazují i při vyšší tepelné expozici a delším čase odolnost již při síle nátěru 0,5 mm, mají však méně izolující vlastnosti oproti grafitovým.

6.7 Formovací materiál

K výrobě formy může být použito vazných nebo samotvrdnoucích směsí, ale především se používá suchý křemenný písek bez pojiv nebo kovové broky. Podle toho rozlišujeme varianty odlévání s použitím modelů z pěnového polystyrenu:

- bez vyjmutí modelu, forma je vyrobena z vazné nebo samotvrdnoucí směsi známými postupy formování,
- s vyjmutím modelu,
- bez vyjmutí modelu, kde je model zasypán buďto kovovými broky, či suchým pískem bez pojiv.

U prvního způsobu lití do bezdutinové formy se tato vyrábí z vazných samotvrdnoucích formovacích směsí. Do formy se zakládají písková jádra pro vytvoření dutin. Model je z pěnového polystyrenu a z formy se odstraňuje zplyněním teplem odlévaného kovu, kde kov postupně zaujímá místo obsazené modelem. Tohoto postupu se využívá pro kusovou nebo malosériovou výrobu (z důvodu nízké ceny modelu). Zplodiny, které vznikají při zplynění polystyrenu, odcházejí průduchy a nálitky do slévárny, což ovšem zhoršuje její pracovní prostředí.

Z tohoto důvodu vznikla druhá varianta spočívající ve vyjmutí polystyrenového modelu z formy, což dovoluje jeho nové použití nebo většinou rozrušení a zničení řezáním, lámáním apod. Forma je také vyrobena z vazné nebo vytvrditelné směsi. Polystyrenový model může mít oproti dřevěnému menší úkosy a je možné použít méně kvalitní pěnový polystyren z hlediska zplyňování. Pro více kusů se vyplatí výroba dřevěného modelu.

Do třetí skupiny patří postup magnetického formování, jeho rozšíření je však malé. Předností tohoto postupu je možnost řízeného tuhnutí a rychlého ochlazování odlitků, pro které by výroba kovových forem (kokil) byla neekonomická. Polystyrenové modely se totiž zasypávají kovovými broky (většinou ocelovými). Zhuštění se dosáhne vibrací.

Celek se umístí do vzduchové mezery magnetického obvodu, který broky zpevní, poté se provede odlití a kov postupně nahrazuje spalující se model. Během lití a tuhnutí může být aplikováno částečné vakuum, které odvádí vzniklé plyny. Po zrušení magnetického pole a po ochlazení se provede vytažení odlitku z formy jednoduchým překlopením kontejneru a broky se po ochlazení a odprášení vrací zpět do cyklu. Výhodou je, že dochází k náhradě křemenného písku.

U posledního způsobu se k zasypávání polystyrenového modelu používá suchý písek bez pojiv. Spěchování se provádí vibrací tak, aby písek mohl vyplnit všechny dutiny modelu. Tato pasáž je velmi důležitá, neboť přehnaná vibrace může deformovat nebo dokonce porušit model, naopak při slabé vibraci jsou dutiny vyplněny nedostatečně a písek je málo स्पेचován. Doba vibrace se volí dle situace obvykle od několika sekund do 2 či 3 minut. Písek je používán převážně křemenný o nízké střední zrnitosti a musí zajistit dobře prodyšnou formu, dovolující odchod plynů z produktů spalování modelu tekutým kovem.

Suchý křemenný písek časem a opětovným používáním zčerná, obsahuje produkty pyrolýzy modelové hmoty. Při správné rychlosti lití a vhodném ostřivu (dobrá prodyšnost) nedochází k exhalacím. Písek se po vysypání z rámu nechá vychladnout a je opět připraven k dalšímu použití. Po vychladnutí odlitku stejně jako u magnetického formování je jeho výklep jednoduchý, stačí pouhé překlopení nádoby s formou nebo přímé vytažení odlitku (stroměčku) po fluidizaci písku. Po odstranění prachových podílů písku a po jeho vychladnutí se tento znovu vrací do použití.

6.8 Srovnání výhod a nevýhod technologie Lost Foam

Výhody:

- nižší pořizovací náklady ve srovnání s klasickou technologií,
- nižší požadavky na výrobní plochu a počet pracovníků,
- odpadá nutné zařízení k výrobě jader, forem, klasického pískového hospodářství a pojiv,
- recirkulace písku, jeho toxická nezávadnost,
- výrazné zvýšení přesnosti odlitků, odpadají technologické úkosity, možnost předlití přesných otvorů,
- nižší náklady na obrábění okolo 30 %,
- vyšší využití tekutého kovu, nižší energetická náročnost,
- několikanásobné snížení pracnosti při cídění odlitků,
- tloušťka odlévaných odlitků od 3 mm s přesností $\pm 0,1$ mm,
- formy pro výrobu modelů jsou z hliníku, životnost se udává cca. 1 milion odlitků,
- vysoká pružnost výroby,
- snížení počtu slévárenských operací,
- odstranění klasického formování,

- snížení nebo dokonce odstranění výroby jader,
- snížení fyzické námahy při práci,
- větší možnost automatizace a robotizace výroby,
- nižší nároky na údržbu,
- nižší nároky na spotřebu nářadí,
- levné formovací rámy,
- bezpojivový systém formy,
- snadná regenerovatelnost písku a jeho vysoké využití,
- snadné vyjímání odlitků z formy,
- jednoduché pískové hospodářství.

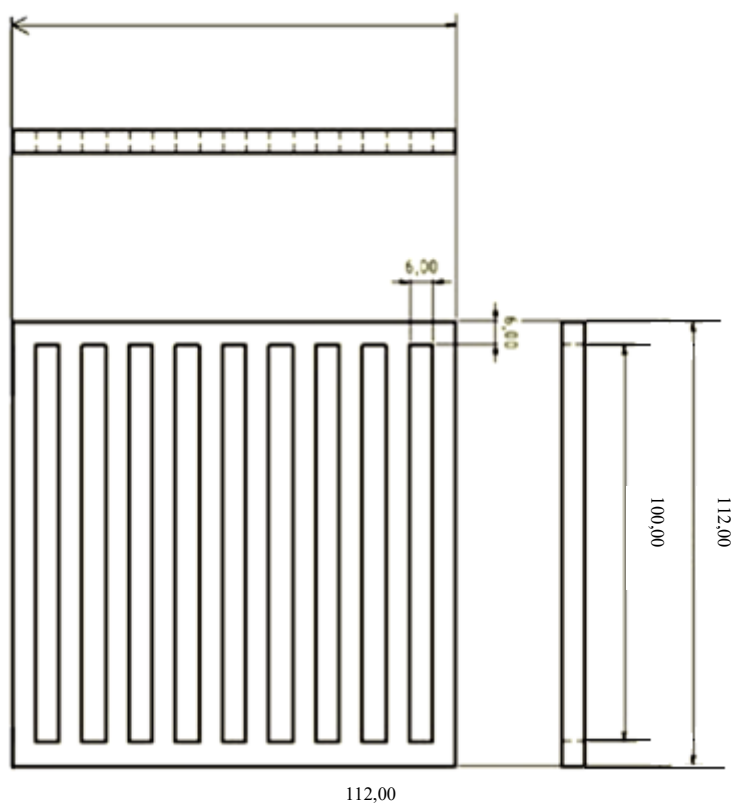
Nevýhody:

- vysoké náklady na výrobu vypěňovacích zařízení,
- nutnost použití technologie pro výrobu středních až velkých sérií odlitků. [24]

7 Postup výroby kovové pěny v laboratorních podmínkách

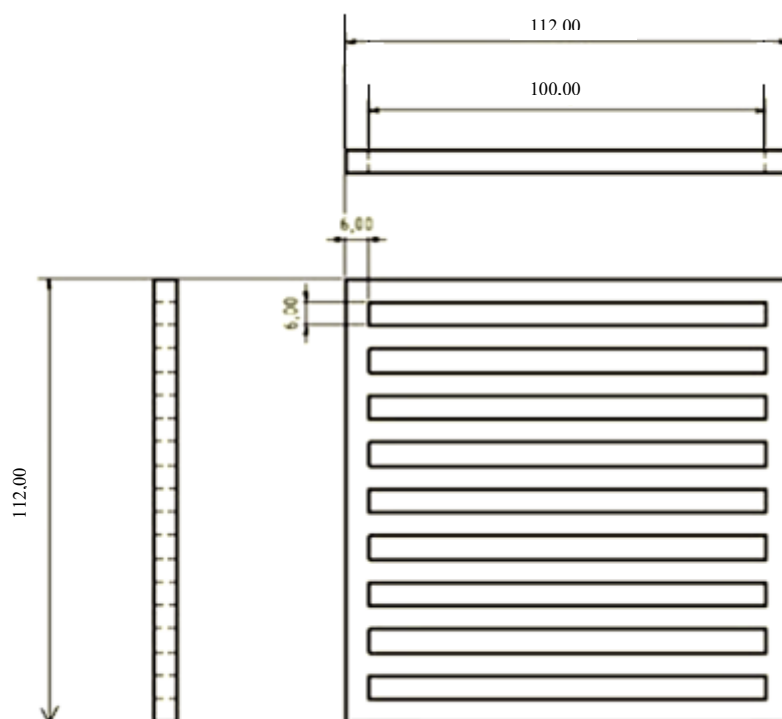
7.1 Výroba modelu

Model k výrobě odlitku byl vyráběn z expandovaného polystyrenu a skládal se ze dvou typů mřížek, a to s vertikálními a horizontálními žebry (Obr. 25, 26). Celkem se model skládal z osmi slepených mřížek. Při jeho sestavování se svislé mřížky střídaly s horizontálními. Jednotlivá žebra mřížky k sobě byla lepena tenkou oboustrannou lepicí páskou 3 M – netkaná tkanina z obou stran potažená akrylovým lepidlem.



Obrázek 25: Mřížka z EPS polystyrenu s vertikálními žebry

Zdroj: Vlastní zpracování



Obrázek 26: Mřížka z EPS polystyrenu s horizontálními žebry

Zdroj: Vlastní zpracování

7.1.1 Lepení oboustrannou páskou

Základní údaje o pásce:

- tloušťka pásky 0,17 mm s ochrannou vrstvou, po odstranění ochranné vrstvy tloušťka 0,03 mm,
- teplotní odolnost v rozsahu -30 až do +65 °C, krátkodobě až do 85 °C.

Výhody použití oboustranné pásky:

- minimální tloušťka pásky neovlivňuje a nemění rozměry modelu,
- přesnost nanesení pásky na jednotlivá žebra mřížky,
- soudržnost lepidla je stejná po celé délce pásky,
- dlouhá manipulační doba s páskou, která tak neztrácí adhezně-kohezní vlastnosti,
- manipulace s páskou nevyžaduje nošení ochranných pomůcek.



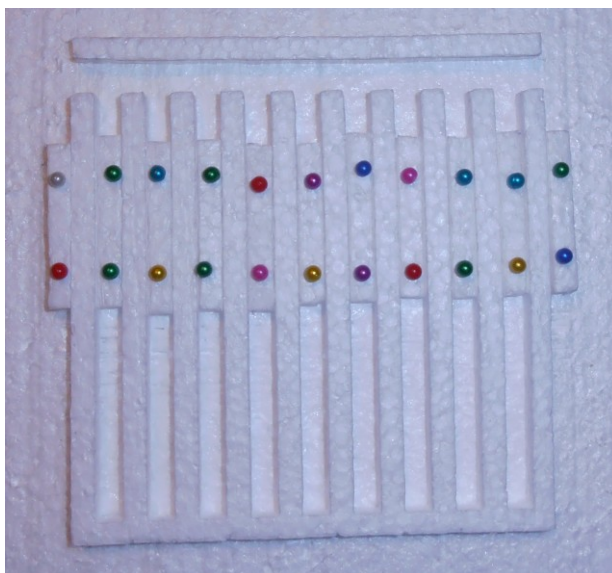
Obrázek 27: Páska z netkané vlákniny potažená akrylovým lepidlem z obou stran

Zdroj: Vlastní zpracování

7.1.2 Lepení modelů

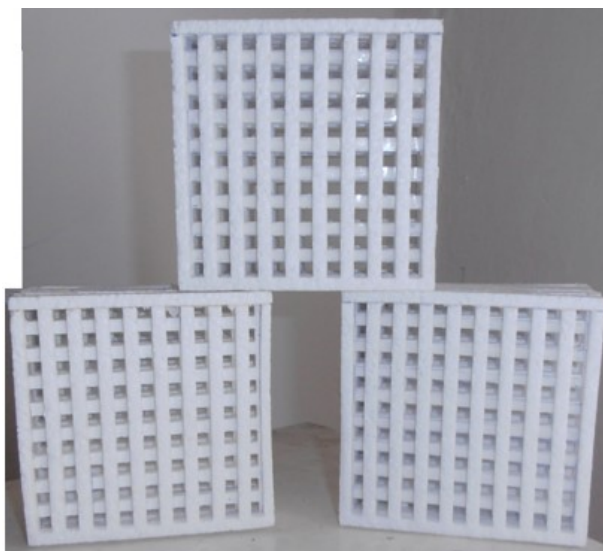
Oboustranná lepicí páska se aplikovala na každé žebro mřížky. Po slepení jednotlivých mřížek jsem zkontroloval geometrickou návaznost, aby nedošlo k nechtěnému posunu, který by tak negativně ovlivnil hotový odlitek. Při jednotlivém skládání a lepení se střídaly mřížky s horizontálními a vertikálními žebry.

Aby byla zachována stejná mezera mezi jednotlivými žebry, vytvořil jsem si rovněž z polystyrenu pomůcku k lepení těchto mřížek (obr. 28).



Obrázek 28: Technika lepení jednotlivých mřížek

Zdroj: Vlastní zpracování



Obrázek 29: Pohled na slepené polystyrenové modely

Zdroj: Vlastní zpracování

7.1.3 Vtoková soustava

Vtoková soustava byla zhotovena rovněž z expandovaného polystyrenu, její dimenzování bylo provedeno standardními výpočty. Ke spojení jednotlivých prvků vtokové soustavy (zářezy, rozváděcí kanál, vtokový kůl) byla taktéž použita oboustranná lepicí páska. Celá soustava je konstruována jako mírně rozměrově předdimenzovaná z důvodu nutnosti tuhosti modelu. Vtoková soustava je navržena jako přetlaková, aby bylo možné zajistit rychlé plnění dutiny, v opačném případě tedy při pomalém lití by hrozilo zhroucení ochranného nátěru a zasypání dutin odlitku.

Vzájemný poměr vtokové soustavy: plocha zářezu S_Z 1 : plocha rozváděcího kanálu S_{RK} 1,1 : plocha vtokového kůlu S_{VK} 1,2

Výpočet

1. Výpočet hmotnosti surového odlitku

1. objem jednoho patra; $11,2 \text{ cm} \times 11,2 \text{ cm} \times 0,6 \text{ cm} = 75,26 \text{ cm}^3$
2. objem otvoru/díry v patře; $0,6 \text{ cm} \times 0,6 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} = 3,6 \text{ cm}^3$
3. objem všech otvorů/děr v patře; $3,6 \text{ cm}^3 \times 9 = 32,4 \text{ cm}^3$
4. objem jednoho patra – objem všech otvorů/děr v patře; $75,26 \text{ cm}^3 - 32,4 \text{ cm}^3 = 42,86 \text{ cm}^3$
5. objem odlitku; $42,86 \text{ cm}^3 \times 8 \text{ (mřížek)} = 342,88 \text{ cm}^3$

Hmotnost odlitku $342,88 \text{ cm}^3 \times 2,8 \text{ g/cm}^3 = 960,06 \text{ g/cm}^3 = 0,96 \text{ kg}$

2. Výpočet doby lití (podle DIETERTA)

$$\tau = k \cdot \sqrt{G} \quad k - \text{koeficient tloušťky pro stěnu o tloušťce 6 mm} = 1,85$$

$$\tau = 1,85 \cdot \sqrt{0,96} \quad G - \text{surová hmotnost odlitku}$$

$$\tau = 1,81 \text{ s}$$

3. Výpočet plochy zářezu (podle Osana)

$$S_Z = \frac{G}{\mu \cdot \rho \cdot \tau \cdot \sqrt{2gH_{stř}}}$$

$$S_Z = \frac{0,96}{0,2 \cdot 2800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 1,81 \text{ s} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 0,096 \text{ m}}}$$

$$S_Z = 0,000\,690\,112 \text{ m}^2 = 690,112 \text{ mm}^2 = 6,901 \text{ cm}^2$$

$$H_{stř} = H - \frac{P^2}{2 \cdot C}$$

$$H_{stř} = 12 \text{ cm} - \frac{4,8 \text{ cm}^2}{2 \cdot 4,8 \text{ cm}}$$

$$H_{stř} = 9,6 \text{ cm} = 0,096 \text{ m}$$

H – rozdíl výšek mezi hladinou taveniny v lící jamce a středem výšky zářezu [m]

P – výška dutiny formy nad středem zářezu [m]

C – celková výška dutiny formy [m]

μ – koeficient odporu proti průtoku [l] – nízká hodnota z důvodu složitosti modelu

ρ – měrná hmotnost kovu [2800 kg.m⁻³]

τ – doba lití [s]

g – tíhové zrychlení [9,81 m.s⁻²]

4. Poměry ploch

plocha zářezu S_Z 1 : plocha rozváděcího kanálu S_{RK} 1,1 : plocha vtokového kůlu S_{VK} 1,2

$690,112 \text{ mm}^2$:	$759,123 \text{ mm}^2$:	$828,134 \text{ mm}^2$
S_Z		S_{RK}		S_{VK}
$S_Z = a.b$		$S_{RK} = a.a$		$S_{VK} = a.a$
$S_Z = a.3^a$		$S = a^2$		$S = a^2$
$S = 3a^2$		$\sqrt{S} = a$		$\sqrt{S} = a$
$\frac{S}{3} = a^2$		$a = \sqrt{759,123}$		$a = \sqrt{828,134}$
$\sqrt{\frac{S}{3}} = a$		$a = 27,552 \text{ mm} = 2,76 \text{ cm}$		$a = 28,777 \text{ mm} = 2,88 \text{ cm}$

$$a = \sqrt{\frac{690,112}{3}}$$

$$a = 15,167 \text{ mm} = 1,52 \text{ cm}$$

rozměry zářezu 4,56 cm x 1,52 cm x 17,2 cm

rozměry rozváděcího kanálu 2,8 cm x 2,8 cm x 11,2 cm

rozměry vtokového kůlu 2,9 cm x 2,9 cm x 9 cm

5. Výpočet objemů

$$V_{\text{zářez}} = 345,056 \text{ mm}^2 \times 172 \text{ mm} = 59\,349,632 \text{ mm}^3 = 0,000\,059\,53 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$V_{\text{rozdávěcí kanál}} = 759,123 \text{ mm}^2 \times 112 \text{ mm} = 85\,021,776 \text{ mm}^3 = 0,000\,085\,022 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$V_{\text{vtokový kůl}} = 828,134 \text{ mm}^2 \times 90 \text{ mm} = 74\,532,060 \text{ mm}^3 = 0,000\,074\,532 \text{ [m}^3\text{]}$$

6. Výpočet celkové hmotnosti odlitku (včetně vtokové soustavy)

$$V_{\text{celkem}} = V_Z + V_{RK} + V_{VK}$$

$$V_{\text{celkem}} = 0,000\,059\,53 + 0,000\,085\,022 + 0,000\,074\,532$$

$V_{\text{celkem}} = 0,000\,219\,084 \text{ [m}^3\text{]}$

Hmotnost vtokové soustavy = $0,000\,219\,084 \times 2800 = 0,613\,435\,200 = 0,613 \text{ [kg]}$

Hmotnost odlitku včetně vtokové soustavy = $0,96 + 0,613 = 1,573 \text{ [kg]}$

7. Využití tekutého kovu

$$\mu = \frac{m_s}{m_s + m_{vs}} \quad m_s - \text{hmotnost surového odlitku [kg]}$$

$$\mu = \frac{0,96}{0,96 + 0,613} = 0,610\,298\,792 \times 100 \text{ [%]} \quad m_{vs} - \text{hmotnost vtokové soustavy [kg]}$$

$$\mu = 61 \text{ \%}.$$

7.1.4 Zářezy

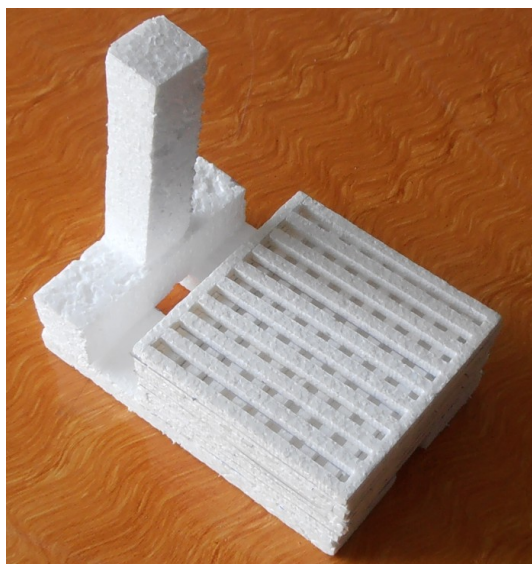
Zářezy zabezpečují tok kovu z rozváděcího kanálu. Pro zjednodušení byl průřez zářezu upraven na obdélníkový tvar o stranách 4,56 cm x 1,52 cm a délce 17,2 cm. Zářezy byly lepeny na mřížku s horizontálními žebry a přes celou spodní plochu odlitku pro zajištění lepšího rozvedení kovu do celého objemu modelu.

7.1.5 Rozváděcí kanál

Rozváděcí kanál slouží k rozvedení taveniny ke všem zářezům, byly použity dva zářezy. Pro zjednodušení byl průřez rozváděcího kanálu upraven na čtverec o stranách 2,8 cm x 2,8 cm a délce 11,2 cm.

7.1.6 Vtokový kůl

Vtokový kůl byl rovněž pro zjednodušení upraven na čtverec o rozměrech 2,9 cm x 2,9 cm a výšky 9 cm. Pro zajištění plynulého a rychlého odlévání se dovnitř vtokového kůlu vyhloubil otvor tak, aby se čelo kovu výrazněji neochladilo.



Obrázek 30: Celkový pohled na sestavený polystyrenový model i s vtokovou soustavou

Zdroj: Vlastní vyhotovení

7.1.7 Povrchová ochrana modelu

Nanesení ochranného nátěru pro zvolenou technologii Lost Foam je velmi důležité. Ochranný nátěr musí splňovat a zajišťovat tyto požadavky:

- musí mít vysokou propustnost plynů, které vznikají při tepelné destrukci polystyrenu,
- slouží jako ochrana proti penetraci kovu do ostříva,
- musí dobře kopírovat povrch modelu, aby nedošlo k nežádoucím změnám rozměrů odlitku,
- musí udržet tvar dutiny.

Pro aplikaci byl zvolen ochranný lihový nátěr Foundrylac ZBM/365, který je relativně srovnatelné kvality s dražšími zirkonovými nátěry. Vyznačuje se velmi dobrou krycí schopností a také vysokou propustností plynu. Žáruvzdornou složkou nátěru jsou oxidy hliníku – korund. Dle doporučení výrobce se má aplikace ochranného nátěru provádět štětcem či namáčením.

Před nanesením ochranného nátěru na model je zapotřebí ho důkladně promíchat a naředit na požadovanou konzistenci, která by neměla být příliš hustá, neboť hrozí po uschnutí popraskání nátěru, a ani příliš tekutá, neboť by nátěr neplnil dokonale svoji ochrannou funkci.

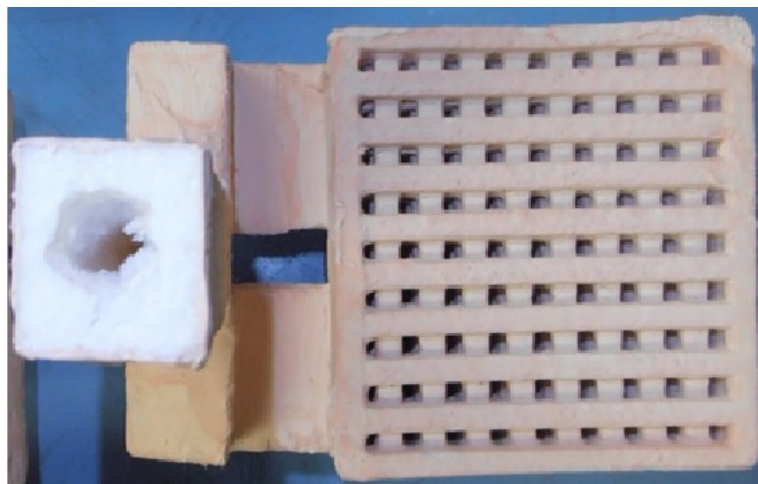
Vzhledem k tvaru a složitosti modelu se aplikace nátěru prováděla namáčením modelu do nátěru, kde z důvodu křehkosti celé soustavy byla soustava rozdělena na model se zářezy

a rozváděcí kanál včetně licího kůlu se namáčely zvlášť. Poté se jednotlivé díly spojily. Přebytek nátěrové hmoty byl rychle okapán ven, aby se vyloučilo nebezpečí vzniku příliš hrubé vrstvy nátěru, což by znemožňovalo následné řádné vyplnění dutin ostřivem. Nátěr se nechal zaschnout po dobu 24 hodin a aplikovala se jeho druhá vrstva, aby se dosáhlo pevné ochranné vrstvy, která brání sesuvu ostřiva do modelu. Po této druhé aplikaci se nátěr opět nechal schnout 24 hodin při okolní teplotě přibližně 21 °C. Připravený model se zaschnutým nátěrem k formování je na obr. 31.



Obrázek 31: Sestavené modely opatřené ochranným nátěrem a připravené k formování

Zdroj: Vlastní zpracování



Obrázek 32: Model s nátěrem

Zdroj: Vlastní zpracování

7.1.8 Formování

K formování bylo použito ostřivo – písek firmy GRUDZÉN LAS Ltd, tj. jemný křemenný slévárenský písek GL 21 o střední velikosti zrna 0,21, který se vyznačuje těmito vlastnostmi:

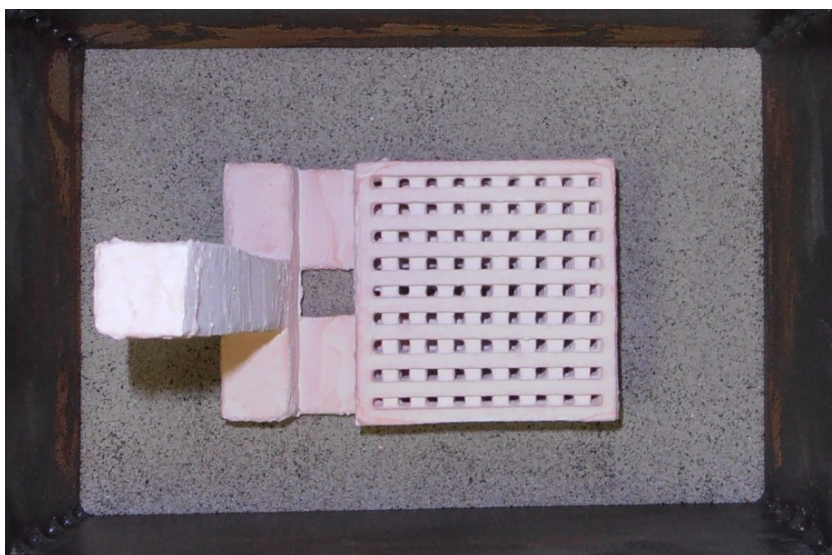
- vysoká čistota s chemickým složením: 99,24 % SiO_2 ; 0,10 % Fe_2O_3 ,
- odolnost proti spékání (do 1550 °C),
- kulatým zrnem.

Toto ostřivo je vhodné pro široké použití a zabezpečuje kvalitní povrch odlitků jak železných, tak i neželezných slitin.

Nejdříve se na dno formovacího rámu nasypal písek (do výšky 4 až 5 cm) a na tuto vrstvu se model položil (Obr. 33). Následně se zasypal do výšky vrchní mřížky a poté se provedlo jeho zavibrování, aby došlo k usazení zářezů modelu do písku. Vibrování s časovým intervalem 2 až 3 minut probíhalo na stroji DISA GEORG FISCHER GF (obr. 34).

Následně se písek dosypal do horní části formy až po hranu a opět následovala 2minutová vibrační pasáž. Na závěr byl vtokový kůl zesílen jednotnou bentonitovou formovací směsí kvůli zpevnění, aby nedošlo k porušení nátěru vlivem vysokého statického tlaku ostřiva působícího na kůl.

Po zaformování modelu se zkrátila přečnívající část vtokového kůlu. Připravenou formu k odlévání znázorňuje obr 35.



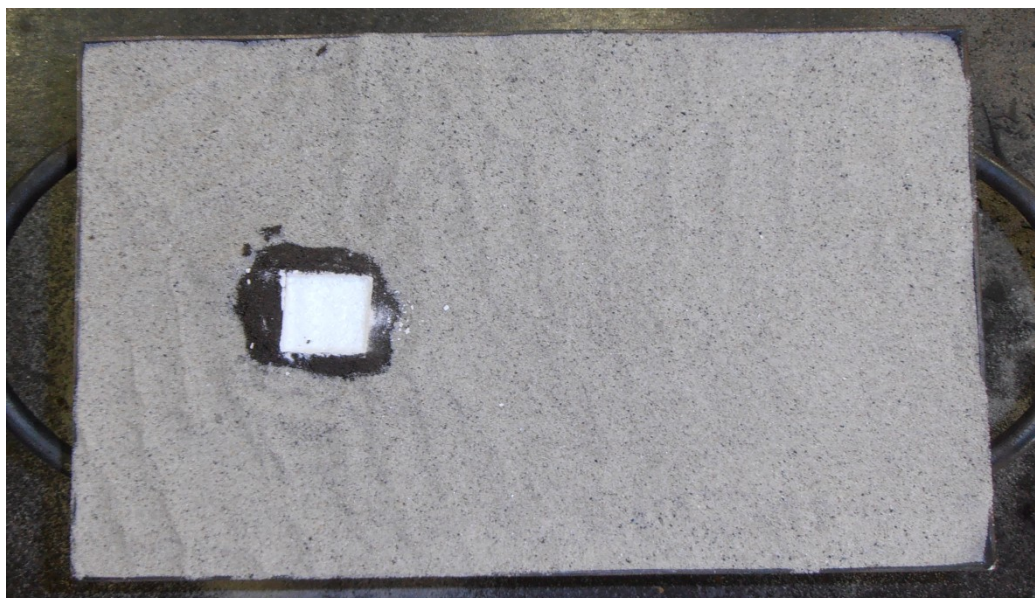
Obrázek 33: Poloha odlitku ve formě

Zdroj: Vlastní zpracování



Obrázek 34: Stroj DISA GEORG FISCHER GF

Zdroj: Vlastní zpracování



Obrázek 35: Připravená forma k odlévání

Zdroj: Vlastní zpracování

7.1.9 Tavicí pec

Tavení probíhalo v grafitošamotovém kelímku v odporové elektrické peci LAC 80/13 (obr. 36). Laboratorní pec disponuje jmenovitým výkonem 13 kW a je schopna dosáhnout teploty 1300 °C.



Obrázek 36: Laboratorní tavicí pec LAC 80/13

Zdroj: Vlastní zpracování

7.1.10 Použitá slitina AlSi10

Slitiny Al – Si patří k nejvýznamnějším slévárenským slitinám, známým jako siluminy. Slitiny hliníku s křemíkem patří vedle litin mezi nejlepší slévárenské slitiny. Zejména slitiny, u nichž leží obsah křemíku v blízkosti eutektického bodu, se vyznačují vynikající zabíhavostí, tj. schopností taveniny dokonale vyplnit formu. Pro tyto slitiny je charakteristický úzký krystalizační interval, tj. rozmezí teplot likvidu a solidu, a tedy velmi malá náchylnost k tvorbě trhlin během tuhnutí a chladnutí odlitku. Mechanické vlastnosti slitin Al – Si jsou závislé na obsahu křemíku, jehož rostoucí obsah zvyšuje tvrdost slitin Al – Si, ale mírně snižuje tažnost.

K tavení se použila hliníková houska slitiny AlSi10, viz obr. 37.

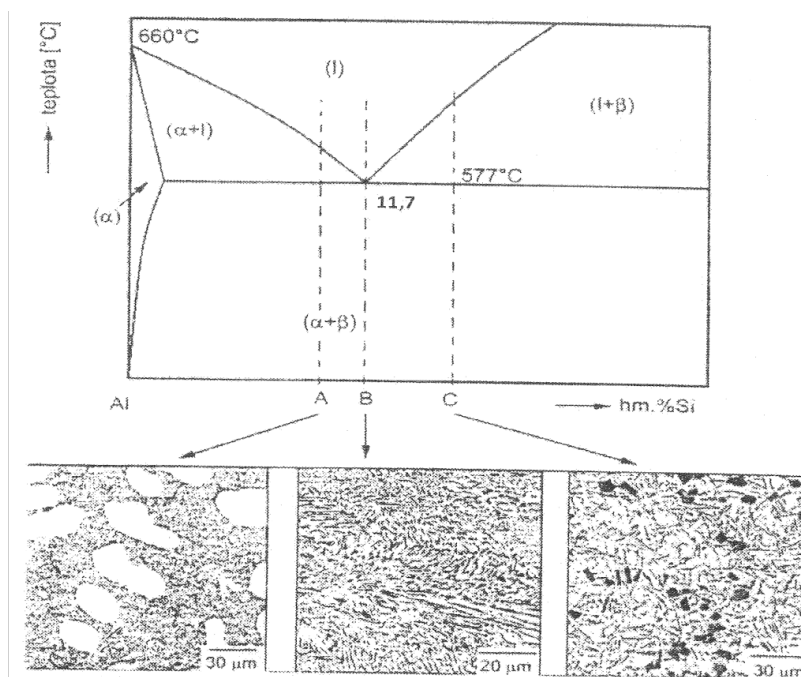


Obrázek 37: Použitá slitina AlSi10 ve formě housky

Zdroj: Vlastní zpracování

Slitiny s obsahem 5–11 % Si jsou podeutektické (nejpočetnější skupina) a jejich strukturu tvoří primární dendrity $\alpha(\text{Al})$ a eutektikum $\alpha(\text{Al}) + \text{Si}$ [27].

Obr. 38 znázorňuje rovnovážný diagram Al–Si a typické strukturní složení v závislosti na obsahu křemíku [28].



Obrázek 38: Rovnovážný diagram Al – Si a typické strukturní složení slitiny dle obsahu křemíku

Zdroj: [28]

7.1.11 Měření teploty taveniny

Před odléváním odlitku se nejprve změřila teplota taveniny pomocí digitálního přenosného zařízení HH806AWE s termočlánkem omega NiCr-Ni (obr. 39). V případě, že teplota taveniny byla nízká, kelímek se vložil zpět do pece k ohřátí taveniny na požadovanou teplotu.



Obrázek 39: Přenosné zařízení s termočlánkem NiCr-Ni k měření teploty taveniny

Zdroj: Vlastní zpracování

7.1.12 Odlévání

Po dosažení požadované teploty slitiny se z jejího povrchu odstranila oxidická vrstva a připravené formy byly odlévány gravitačně. Při odlévání bylo nutné udržet vysokou rychlost lití, aby nevzniklo nebezpečí zborcení nátěrové hmoty. Plnění formy tekutým kovem probíhalo plynule.

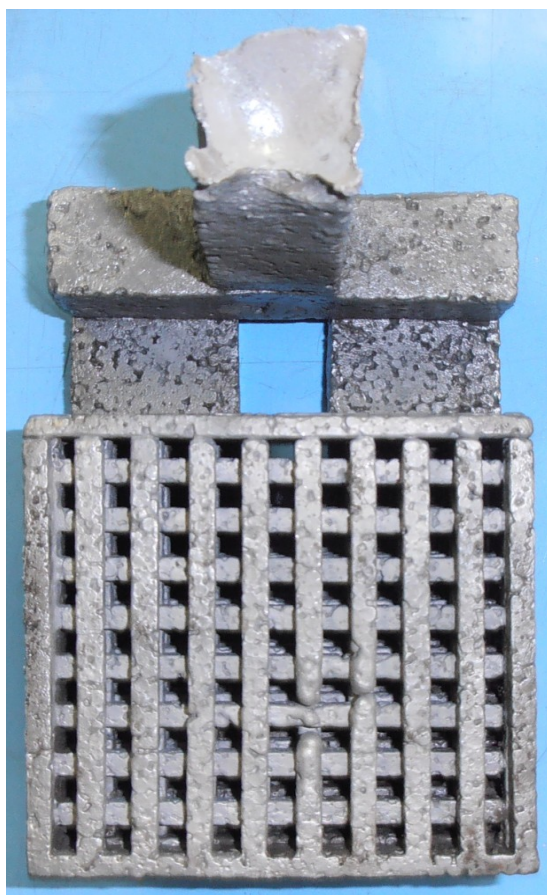
7.1.13 Odlité odlitky

Celkem bylo odlito 10 kusů odlitků. Teploty odlévání byly 715 °C, 743 °C, 762 °C, 777 °C, 871 °C. Odlévalo se po dvou kusech odlitků.



Obrázek 40: Odlitek se zbytky ochranného nátěru, teplota odlévání 777 °C

Zdroj: Vlastní zpracování



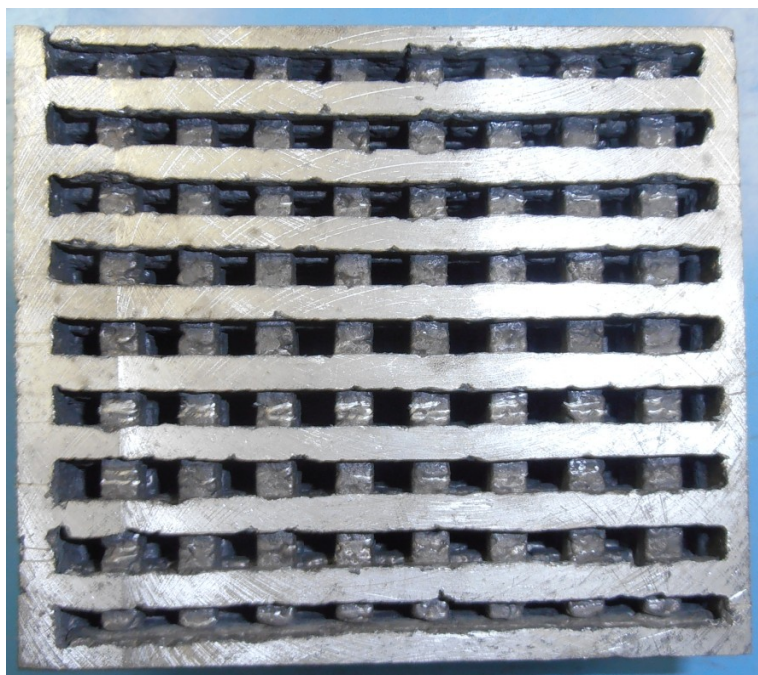
Obrázek 41: Očištěný odlitek, teplota odlévání 777 °C

Zdroj: Vlastní zpracování



Obrázek 42: Očištěný odlitek, spodní pohled se zářezy, teplota odlévání 777 °C

Zdroj: Vlastní zpracování



Obrázek 43: Obrobený odlitek (777 °C)

Zdroj: Vlastní zpracování

7.1.14 Vyhodnocení odlitků

Celkem bylo odlito 10 kusů odlitků. V tabulce č. 1. jsou uvedené teploty odlévání jednotlivých odlitků a jejich vady.

Tabulka 1: Přehled teplot a vad odlitých odlitků

Odlitek č.	Teplota odlévání	Vada
1,2	715 °C	Nezaběhnutí (Obr. 44, 45)
3,4	743 °C	Nezaběhnutí (Obr. 46, 47)
5,6	762 °C	Nezaběhnutí (Obr. 48, 49)
7,8	777 °C	Nezaběhnutí (Obr. 50, 51)
9,10	871 °C	- (Obr. 52, 53)

Zdroj: Vlastní zpracování

Odlévání při nízké teplotě se projevilo na odlitcích (1 až 8) nezaběhnutím. Postupné zvyšování teploty taveniny se projevilo jako účinné a při poslední, nejvyšší teplotě 871 °C bylo dosaženo plného zaběhnutí odlitků.

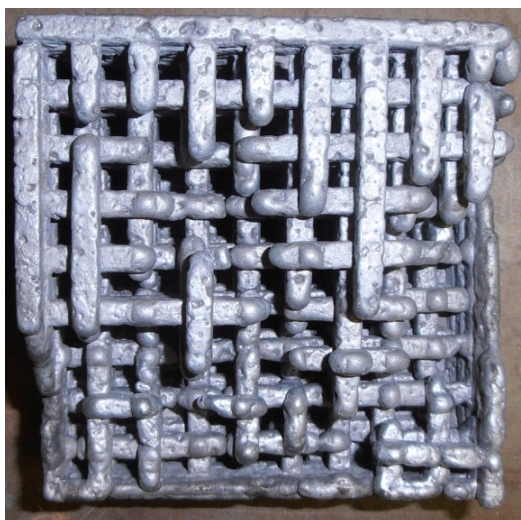
Teplota 715 °C znamenala u odlitků č. 1, 2 značné nezaběhnutí, nespojení žeber. Teplota 743 °C se projevila nespojením 6 horních žeber u odlitku č. 3 a u odlitku č. 4 dvěma horními žebry. Teplota 762 °C znamenala nespojení 4 horních žeber u odlitků č. 5, 6. Teplota 777 °C

znamenal nespojení dvou žeber u odlitku č. 7 a u odlitku č. 8 se nespojilo jedno horní žebro. Teplota 871 °C se projevila dokonalým zaběhnutím obou odlitků č. 9 a č. 10.

Je však nutno podotknout, že tak vysoká teplota odlévání může mít již negativní vliv na výsledné mechanické vlastnosti odlitých odlitků.

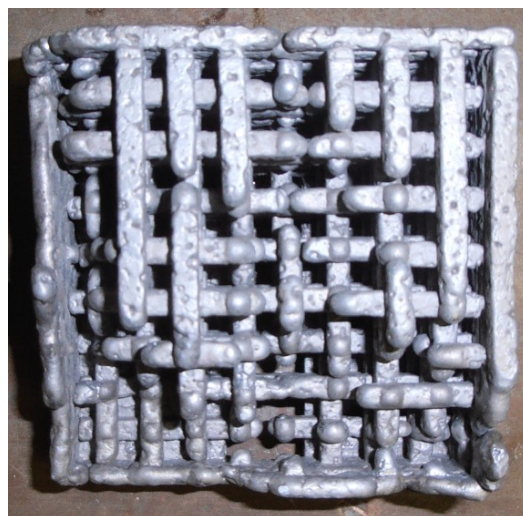
Optimální teplota odlévání proto bude ležet mezi teplotami pod 871 °C, ne však nižší než 777 °C.

Možnou další příčinou nezaběhnutí, nespojení žeber odlitků mohlo být způsobeno pomalým litím nebo porušením ochranného nátěru.



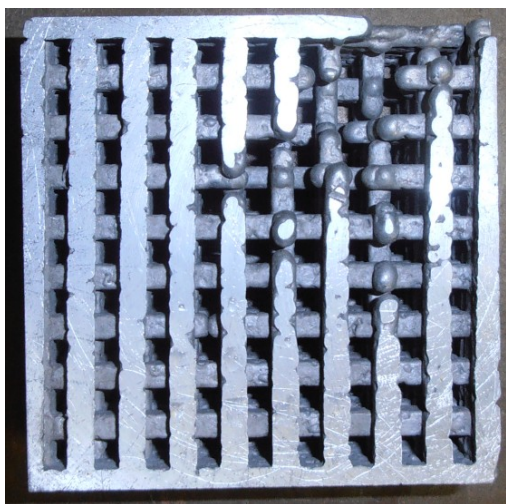
Obrázek 44: Odlitek č. 1 (715 °C)

Zdroj: Vlastní zpracování



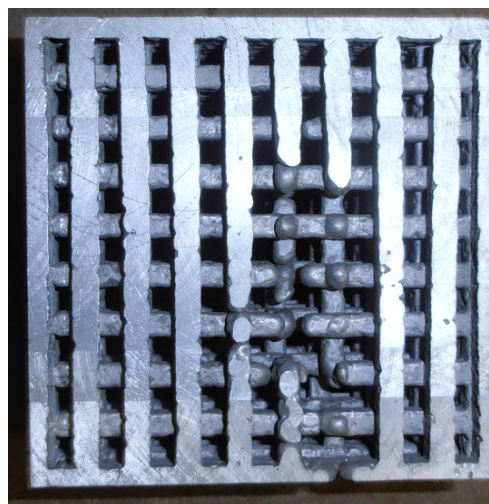
Obrázek 45: Odlitek č. 2 (715 °C)

Zdroj: Vlastní zpracování



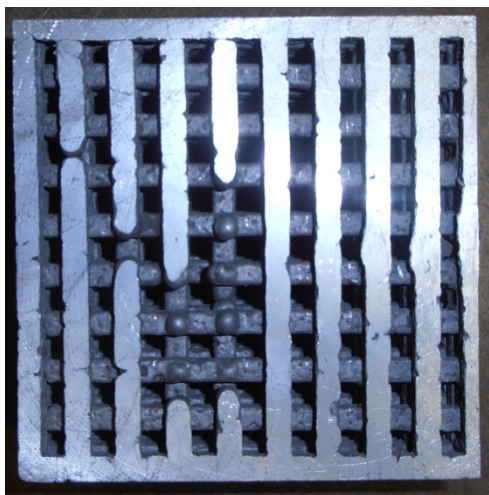
Obrázek 46: Odlitek č. 3 (743 °C)

Zdroj: Vlastní zpracování



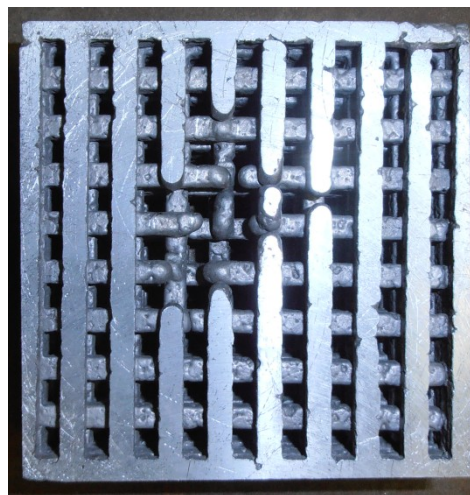
Obrázek 47: Odlitek č. 4 (743 °C)

Zdroj: Vlastní zpracování



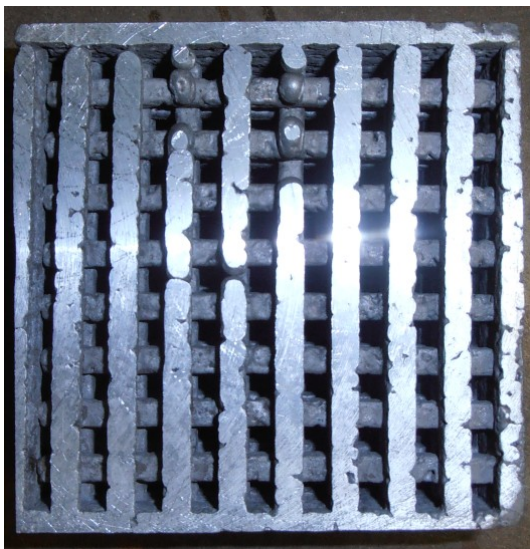
Obrázek 48: Odlitek č. 5 (762 °C)

Zdroj: Vlastní zpracování



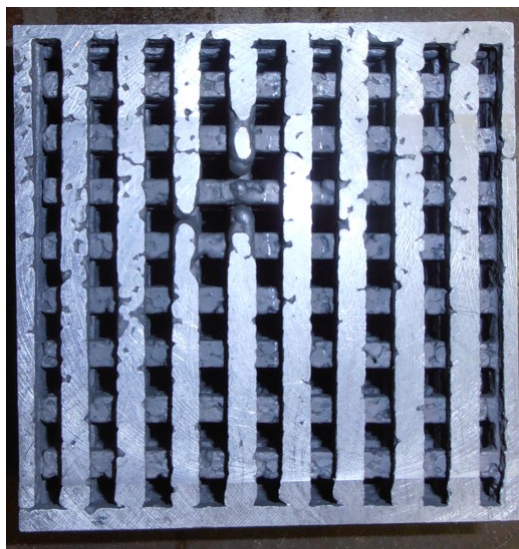
Obrázek 49: Odlitek č. 6 (762 °C)

Zdroj: Vlastní zpracování



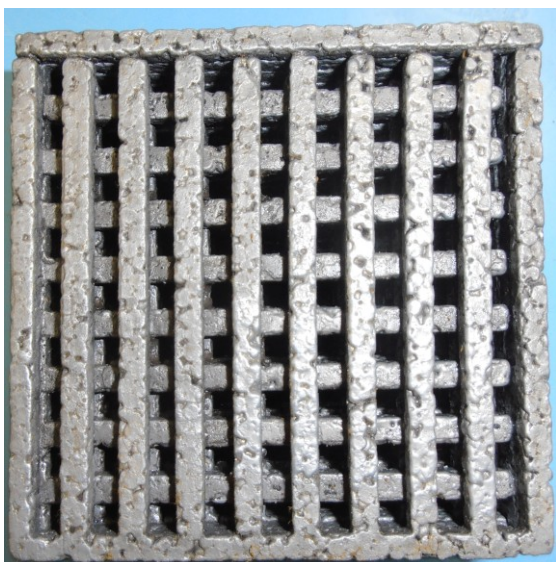
Obrázek 50: Odlitek č. 7 (777 °C)

Zdroj: Vlastní zpracování



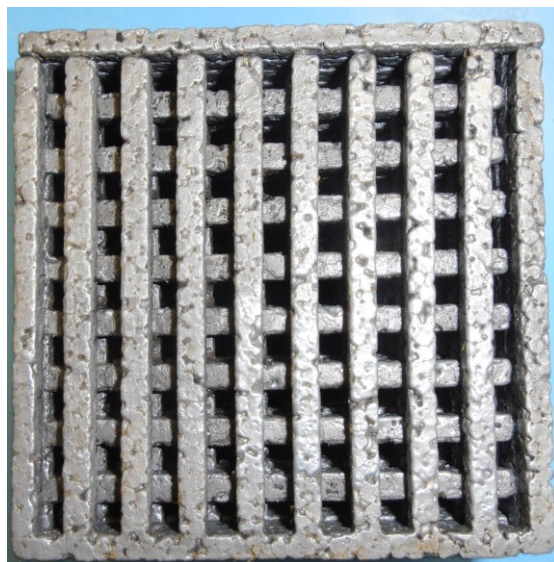
Obrázek 51: Odlitek č. 8 (777 °C)

Zdroj: Vlastní zpracování



Obrázek 52: Odlitek č. 9 (871 °C)

Zdroj: Vlastní zpracování



Obrázek 53: Odlitek č. 10 (871 °C)

Zdroj: Vlastní zpracování

8 Závěr

Diplomová práce byla zaměřena na téma výroby a vlastností litých kovových pěn s pravidelnou strukturou. V teoretické části práce byly popsány vlastnosti charakterizující kovové pěny, dále jednotlivé slévárenské postupy výroby kovových pěn a nakonec oblasti použití a využití těchto kovových pěn. Kovové pěny se využívají v různých průmyslových oborech vzhledem k jejich vlastnostem, jako jsou nízká hmotnost, nehořlavost, schopnost pohlcovat nárazovou energii, izolační vlastnosti. Největší uplatnění nacházejí v automobilovém průmyslu, kde slouží především jako pohlcovače nárazové energie v deformačních zónách automobilů, díky své nízké hmotnosti snižují také hmotnost automobilů, což má příznivý vliv na snížení spotřeby paliva, dále nachází uplatnění v těchto odvětvích: lehký průmysl, stavební průmysl, lodní průmysl a lékařský průmysl. Široké oblasti použití činí tento materiál zcela unikátním.

Praktická část se zaměřuje na ověření metody Lost foam k výrobě kovových pěn z hliníkových slitin s pravidelnou buněčnou strukturou s ohledem na dostupnost materiálů a možnostem v provozních laboratorních podmínkách školy. Účelem praktické části bylo vytvořit hliníkové pěny s pravidelnou buněčnou strukturou pomocí zvolené metody a připravit optimální parametry slévárenské výroby k zajištění zdravých odlitků, které mohou poté sloužit k dalšímu výzkumu. Důraz byl kladen především na sledování teploty odlévané slitiny a čistoty. Zkoušením se zjistilo, že při formování polystyrenového modelu není potřebné formu ukládat na vibrační stroj, ale že postačí ruční stříhání k usednutí zářezů do písku přiměřeně silným poklepem formovacího rámu o podlahu, tím se zajistí stejné usednutí zářezů do písku jako na vibračním stroji. Experimentálním měřením se dále zjistilo, že zvyšování teploty taveniny se projevuje zvyšující se zabíhavostí slitiny.

Rovněž je zapotřebí zdůraznit nutnou pečlivost při sestavování jednotlivých modelů, počínaje přesným lepením polystyrenových modelů včetně prvků vtokové soustavy, důslednou aplikací žárovzdorného ochranného nátěru přes formování až po samotné odlévání odlitků. Zvládnutí tohoto procesu umožnilo vytvořit zdravé odlitky bez zjevných vad.

9 Seznam použité literatury

- [1] NĚMEC, M. a J. PROVAZNÍK. *Slévárenské slitiny neželezných kovů*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008. ISBN 978-80-01-04116-1.
- [2] ROUČKA, J. *Metalurgie neželezných slitin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- [3] MICHNA, Š. a S. KUŚMIERCZAK. *Technologie a zpracování hliníkových materiálů: (učební texty)*. Ústí nad Labem: Fakulta výrobních technologií a managementu, Univerzita J.E. Purkyně, 2008. ISBN 978-80-7044-998-1.
- [4] GRGAČ, P., J. JANOVEC a M. DOMÁNKOVÁ. *Nové materiály a technológie*. Bratislava: STU, 2007. ISBN 978-80-227-2599-6.
- [5] MICHNA, Š. et al. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-890-4188-4.
- [6] Metal foam. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Metal_foam
- [7] BANHART, John. *Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams* [online]. *Progress in Materials Science*. 2001, 46, s. 559-632 [cit. 2017-04-6]. Dostupné z: <http://www.uniroma2.it/didattica/tbs2/deposito/Manufacture,_characterisation_and_application_of_cellular_metals_and_metal_foams.pdf>.
- [8] DRENCHEV, L. et al. Gasars: a class of metallic materials with ordered porosity. *Materials Science and Technology*. 2006, Vol. 22, No 10.
- [9] GAILLARD, Y. et al. Les mousses d'aluminium CTIF par voie de fonderie. *Fonderie–Fondeurd'aujourd'hui*. 2005, No. 250, S. 13-24.
- [10] BELÁK, K. *Hliníkové pěny a jejich využití v technické praxi*. Brno, 2016. Bakalářská práce Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Karel Němec.

- [11] DUARTE, I. a M. OLIVEIR. Aluminium Alloy Foams: Production and Properties. In: KONDOH, K. *Powder Metallurgy* [online]. Rijeka: InTech, 2012. ISBN 978-953-51-0071-3 [cit. 2017-04-9]. Dostupné také z: <http://www.intechopen.com/books/powdermetallurgy/aluminium-alloys-foams-production-and-properties>
- [12] CHOLEWA, M. et al. The skeleton castings as a new type of cast lattice structures [online]. *Journal AMME*. 2012, vol. 54, October [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: http://jamme.acmsse.h2.pl/papers_vol54_2/54213.pdf
- [13] HAYDN, N. a O. WADLEY. Multifunctional periodic cellular metals. *Trans. R. Soc. A*. 2006, Vol. 364, S. 31-68.
- [14] ZYRYANOVÁ, I. *Lité kovové pěny z Al slitin*. Ostrava, 2011. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství. Vedoucí práce Vlasta Bednářová.
- [15] EVANS, A. G. et al. *The topological design of multifunctional cellular metals* [online]. New Jersey: Princeton University, s. 34 a 37 [cit. 2017-04-11]. Dostupné také z: <http://www.cellularmaterials.com/papers/benchmark.pdf>.
- [16] ELBEL, T., *Základy slévárenské technologie od historie po současnost*. 1.vyd. Ostrava: VŠB-TU, 2006.
- [17] VAŇKOVÁ, A. *Výroba a vlastnosti litých pěn se stochastickou strukturou ze slitin Cu, Al a Fe*. Ostrava, 2014. Diplomová práce. VŠB TU Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, Katedra metalurgie a slévárenství. Vedoucí práce Petr Lichý.
- [18] KROUPOVÁ, I. *Vlastnosti a použití litých kovových pěn*. Ostrava, 2013. Diplomová práce. VŠB TU Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, katedra metalurgie a slévárenství. Vedoucí práce Petr Lichý.
- [19] GAWRONOVÁ, M. *Lité kovové pěny s pravidelnou buňkovou strukturou*. Ostrava, 2013. VŠB TU Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, katedra metalurgie a slévárenství. Vedoucí práce Vlasta Bednářová.
- [20] Müller, P. *Návrh způsobu odlévání pro lité kovové pěny s nepravidelnou strukturou*. Ostrava, 2013. VŠB TU Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, katedra metalurgie a slévárenství. Vedoucí práce Vlasta Bednářová.

- [21] SPEVÁKOVÁ, Š. Kovové pěny. *Ceskatelevize.cz* [online]. Praha: Česká televize, 2011 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <<http://www.ceskatelevize.cz/porady/10121359557-port/tagy/kovova-pena/685-kovove-peny/>>.
- [22] GLORIUS, S. et al. Metal Foam - Biocement Composites: mechanical and biological properties and perspectives for bone implant design. *Fraunhofer.de* [online]. 2010 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://www.ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/de/documents/dd/Publikationen/2010/D6_Nies.pdf>.
- [23] Fraunhofer.de. Titanium foams replace injured bones. *Fraunhofer.de* [online]. 2010 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <<http://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2010/09/titanium-foams-replaceinjured-bones.html>>.
- [24] LICHÝ, P. Speciální metody výroby odlitků. Ostrava: VŠB- TUO Ostrava, Fakulta metalurgie a slévárenství. Studijní učební text, studijní opora.
- [25] DOBŘANSKÝ, J. Optimalizace výroby litých kovových pěn s pravidelnou buňkovou strukturou. Ostrava, 2015. Diplomová práce. VŠB TU Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství. Katedra metalurgie a slévárenství. Vedoucí práce Vlasta Bednářová.
- [26] MEHLHOFF, B. Chevrolet Vortec 4200 Inline Six Engine - New Six On The Block. *Superchevy.com* [online]. 2001 [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.superchevy.com/how-to/83758-chevrolet-vortec-4200-inline-six-engine/#>
- [27] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [28] NĚMEC, M., B. BEDNÁŘ a B. BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie slévání*. Praha: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04395-0.
- [29] Depositphotos.com. *Kostní struktura – Stock obrázek* [online]. 2017 [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://cz.depositphotos.com/73309957/stock-photo-bone-structure.html>
- [30] Depositphotos.com. *Kostní struktura: detail* [online]. 2017 [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: http://st2.depositphotos.com/1987851/6337/i/950/depositphotos_63378621-stock-photo-bone-structure.jpg

[31] Kovová pěna. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Kovov%C3%A1_p%C4%Bna

[32] KÖNIG, A. H. et al. AlVis - An Aluminium-Foam Visualization and Investigation Tool. *Tuwien.ac.at* [online]. 1999 [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <https://www.cg.tuwien.ac.at/research/vis/Miscellaneous/alufoam/>

10 Seznam obrázků

Obrázek 1: Celulární struktura rostlinné stopky	10
Obrázek 2: Struktura pěnového hliníku	9
Obrázek 3: Kostní struktura	11
Obrázek 4: Hliníková pěna	11
Obrázek 5: Detail kostní struktury	10
Obrázek 6: Kovová pěna s otevřenými póry	15
Obrázek 7: Kovová pěna s uzavřenými póry	16
Obrázek 8: Kovová pěna s pravidelným uspořádáním pórů	16
Obrázek 9: Kovová pěna se stochastickým uspořádáním pórů	17
Obrázek 10: Tvary a rozmístění pórů; a) kulaté póry, b) radiální, c) válcové, d) až f) lamelární rozložení	18
Obrázek 11: Diagram závislosti napětí na deformaci kovové pěny	19
Obrázek 12: Způsoby výroby kovových pěn	20
Obrázek 13: Výroba kovové pěny s pomocí polymerní pěny	22
Obrázek 14: Metoda odpařitelného modelu	23
Obrázek 15: Výroba kovové pěny s otevřenými póry použitím preformy rozpustné ve vodě	25
Obrázek 16: Schéma výroby kovové pěny z ABS plastu	26
Obrázek 17: Mřížový odlitek ze slitiny hliníku	26
Obrázek 18: Možnosti aplikace vyztuženého pěnového hliníku	27
Obrázek 19: Použití kovových pěn v průmyslu	28
Obrázek 20: Použití hliníkové pěny v deformační zóně automobilu	29
Obrázek 21: Rám s hliníkovou pěnou po deformaci	29
Obrázek 22: Model držáku motoru pro BMW, zleva dutý odlitek, odlitek s pěnovým jádrem, řez odlitek	30
Obrázek 23: Kovová pěna z titanu	31
Obrázek 24: Blok motoru: vlevo hotový odlitek, vpravo model z EPS, odlitek je přesnou kopií modelu	35
Obrázek 25: Mřížka z EPS polystyrenu s vertikálními žebry	41
Obrázek 26: Mřížka z EPS polystyrenu s horizontálními žebry	42
Obrázek 27: Páska z netkané vlákniny potažená akrylovým lepidlem z obou stran	43
Obrázek 28: Technika lepení jednotlivých mřížek	43

Obrázek 29: Pohled na slepené polystyrenové modely	44
Obrázek 30: Celkový pohled na sestavený polystyrenový model i s vtokovou soustavou.....	48
Obrázek 31: Sestavené modely opatřené ochranným nátěrem a připravené k formování.....	49
Obrázek 32: Model s nátěrem.....	49
Obrázek 33: Poloha odlitku ve formě	50
Obrázek 34: Stroj DISA GEORG FISCHER GF	51
Obrázek 35: Připravená forma k odlévání.....	51
Obrázek 36: Laboratorní tavicí pec LAC 80/13	52
Obrázek 37: Použitá slitina AlSi10 ve formě housky	53
Obrázek 38: Rovnovážný diagram Al – Si a typické strukturní složení slitiny dle obsahu křemíku	53
Obrázek 39: Přenosné zařízení s termočlánkem NiCr-Ni k měření teploty taveniny.....	54
Obrázek 40: Odlitek se zbytky ochranného nátěru, teplota odlévání 777 °C	55
Obrázek 41: Očištěný odlitek, teplota odlévání 777 °C	55
Obrázek 42: Očištěný odlitek, spodní pohled se zářezy, teplota odlévání 777 °C	55
Obrázek 43: Obrobený odlitek (777 °C)	56
Obrázek 44: Odlitek č. 1 (715 °C)	57
Obrázek 45: Odlitek č. 2 (715 °C)	56
Obrázek 46: Odlitek č. 3 (743 °C)	58
Obrázek 47: Odlitek č. 4 (743 °C)	57
Obrázek 48: Odlitek č. 5 (762 °C)	58
Obrázek 49: Odlitek č. 6 (762 °C)	58
Obrázek 50: Odlitek č. 7 (777 °C)	59
Obrázek 51: Odlitek č. 8 (777 °C)	58
Obrázek 52: Odlitek č. 9 (871 °C)	59
Obrázek 53: Odlitek č. 10 (871 °C)	58